

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Technologický postup svařování kompresoru

Technological procedure for welding of the compressor

Student:

Radek Zatloukal

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.

Ostrava 2015

Zadání bakalářské práce

Student: **Radek Zatloukal**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2303R002 Strojírenská technologie**
Téma: **Technologický postup svařování kompresoru**
Technological Procedure for Welding of the Compressor

Zásady pro vypracování:

- 1) Prostudujte svařitelnost materiálu pro výrobu kompresoru.
- 2) Navrhněte možné způsoby svařování jednotlivých částí kompresoru.
- 3) Pro vybrané svarové spoje zpracujte technologický postup svařování.
- 4) Navrhněte ověření vlastností vybraných svarových spojů.
- 5) U zvoleného svarového spoje bod 4 realizujte.

Seznam doporučené odborné literatury:

KOUKAL, J., ZMYDLENÝ, T. *Svařování I: Učební texty*. 1. vydání. VŠB-TU Ostrava. 2005. 133 s. ISBN 80-248-0870-6
KOUKAL, J., SCHWARZ, D., HAJDÍK, J. *Materiály a jejich svařitelnost: Učební texty*. 1. vydání. VŠB-TU Ostrava. 2009. 240 s. ISBN 978-80-248-2025-5
HRIVŇÁK, I. *Teória zvariteľnosti kovov a zliatin*. 1. vydání. VSAV Bratislava. 1989. 344 s. ISBN 80-224-0016-5
ČSN EN ISO 15614-1 *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupů svařování - Část. 1: Obloukové a plamenové svařování ocelé a obloukové svařování niklu a slitin niklu*. Praha: Český normalizační institut, 2005

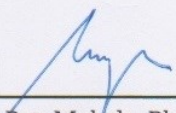
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.**

Datum zadání: 12.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015



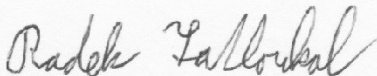

doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 18.5.2015

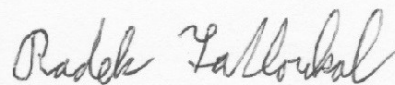
A handwritten signature in black ink, appearing to read "Radek Zdeněk", written on a light blue rectangular background.

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 18. 5. 2015



podpis

Jméno a příjmení autora práce: Radek Zatloukal

Adresa trvalého pobytu autora práce: Polní 384, Kojetín, 752 01

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Zatloukal, R. *Technologický postup svařování kompresoru: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2015, 51 s. Vedoucí práce: Schwarz, D.

Práce se v teoretické části zabývá problematikou svařitelností uhlíkových ocelí a litiny. Dále je vytvořen technologický postup svařování vybrané části kompresoru. Navrženy jsou také alternativní metody, kterými by mohlo svařování proběhnout. Popis principu těchto metod je zde uveden také. V experimentální části jsou provedeny zkoušky na ověření vlastností zkušebních vzorků. Na závěr je provedeno shrnutí výsledků a navržení možných dalších řešení.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

Zatloukal, R. *Technological procedure for welding of the compressor: bachelor thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2015, 51 p. Thesis head: Schwarz, D.

In theoretical part is described the weldability of carbon steel and cast iron. It is also created by the technological process of welding the selected part of the compressor. Designed are also alternative methods that could welding run. Description of the principle of these methods is also given. The experimental part conducted tests to verify the characteristics of the test samples. In conclusion sums up the results and propose possible further solutions.

Obsah

	strana
Seznam použitých značek a symbolů	7
1. Úvod.....	8
2. Studium svařitelnosti	9
2.1 Svařitelnost uhlíkových ocelí	9
2.2 Svařitelnost litiny	9
2.2.1 Vlastnosti litin určující jejich svařitelnost.....	10
2.2.2 Požadované vlastnosti svarového spoje.....	10
2.2.3 Přídavné materiály.....	11
2.2.4 Metody svařování	11
2.2.5 Teplené zpracování svařenců	12
2.2.6 Subjektivní vliv svářeče.....	12
3. Oduhličení	12
4. Popis metod svařování.....	13
4.1 Metoda 135 – obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu.....	13
4.2 Metoda 141 – obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu	15
4.3 Metoda 52 – Laserové svařování	16
5. Návrh postupu svařování.....	18
6. Ověření vlastností svarových spojů	20
6.1 Makroskopické šetření	20
6.2 Mikroskopické šetření	25
6.3 Zkouška tvrdosti.....	37
6.4 Zkouška mikrotvrdosti	38
7. Závěr	46
8. Poděkování.....	47
9. Použitá literatura	48
10. Seznam příloh:.....	49
Příloha A – výsledek zkoušky tvrdosti	50
Příloha B – výsledek zkoušky mikrotvrdosti	51

Seznam použitých značek a symbolů

Označení	Výklad
Ar	Argon
C	uhlík
CO ₂	Oxid uhličitý
Cr	chrom
H ₂	Vodík
He	Helium
HV	Tvrdost podle Vickerse
Mn	Mangan
N ₂	Dusík
Ni	nikl
O ₂	Kyslík
P	Fosfor
S	Síra
Si	Křemík
SK	Svarový kov
TOO	Teplotně ovlivněná oblast
ZM	Základní materiál
λ	Vlnová délka [m]

1. Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá vytvořením technologického postupu svařování vybrané části kompresoru a součástí je také ověření vlastností svaru na několika zkušebních vzorcích v podobě zkoušek makrostruktury, mikrostruktury, tvrdosti a mikrotvrdosti. Dalším cílem této práce je i návrh alternativních metod svařování jinou technologií.

Materiál pláště je uhlíková ocel, a k němu je přivařená litinová součást. Litina patří mezi materiály, které jsou obtížně svařitelné. Z toho důvodu lze předpokládat, že se ve zkušebních vzorcích objeví vady.

2. Studium svařitelnosti

Materiály použité na výrobu části kompresoru, jenž řeší tato práce, jsou dva. Uhlíková ocel P265GH ve formě plechu skruženého na určitý průměr, a k němu přivařená šedá litina s lupínkovým grafitem GJL-250.

2.1 Svařitelnost uhlíkových ocelí

Svařitelnost těchto ocelí je dána především chemickým složením, největší vliv zde má především obsah uhlíku. Výrobci ocelí zde většinou garantují pouze obsahy C, Mn, Si, P a S. Platí, že se zvětšujícím se obsahem roste mez kluzu, mez pevnosti a tvrdost, ovšem plastické vlastnosti se snižují. S rostoucím obsahem uhlíku také roste náchylnost oceli k zakalení, a také náchylnost na vznik studených trhlin především v teplotně ovlivněné oblasti svarového spoje. Oceli menších tloušťek se obvykle nemusí předehřívat. Dohřev zde také většinou není nutný vyjma velkých tloušťek materiálů. Teplotu interpass – mezihousenkovou teplotu – obvykle nepředepisujeme. Přídavné materiály se zde volí dle požadovaných mechanických vlastností svarového kovu, které musí odpovídat vlastnostem požadovaným pro danou konstrukci. [4, 8]

2.2 Svařitelnost litiny

Litina se svařuje obtížně, přesto při dodržení teorií zjištěných a praxí ověřených zásad lze často vytvořit spoje požadovaných užitkových vlastností. Mezi faktory, které vzájemně spolupůsobí a ovlivňují kvalitu svarových spojů, patří:

- a, vlastnosti litin, určující jejich svařitelnost
- b, požadované vlastnosti svarového spoje
- c, přídavné materiály
- d, použitá metoda svařování

e, tepelné zpracování svařenců

f, subjektivní vliv svářeče

Podrobnější popis těchto faktorů je rozebrán v následujícím textu.

2.2.1 Vlastnosti litin určující jejich svařitelnost

Mezi rozhodující vlastnosti, které v nepříznivém směru ovlivňují svařitelnost litin, patří především chemické složení, heterogenita a fyzikálně-mechanické vlastnosti. Největší vliv mají obsahy C, Si, S a P. Litiny mají obsah uhlíku obvykle nad 3 hm. %, tzn. 14 až 19x více než u oceli. Tím se vlivem teplotního cyklu vytváří ve svarových spojích, v podhousenkové oblasti, křehká vrstva středně až vysokouhlíkového martenzitu, což způsobuje vznik studených trhlin. Obsah křemíku je také větší v litinách než v oceli, a to přibližně 4 až 8 krát. To působí grafitizačně, tj. podporuje vylučování uhlíku z tuhnoucí taveniny ve formě grafitu, což působí příznivě na svařitelnost. Nevýhodou ovšem je, že takto vysoký obsah křemíku zhoršuje mechanické vlastnosti feritu. Kvůli zvýšeným obsahům síry a fosforu zde mohou vznikat horké trhliny, které mohou iniciovat vznik studených trhlin. Litina má poměrně vysokou teplotní roztažnost a nízkou tepelnou vodivost. Zejména u šedých litin je problémová i jejich nízká plasticita a houževnatost, díky kterým ve svařencích vznikají vysoká svarová napětí. Řešením je buď volba svařovací metody, při kterých budeme minimalizovat úroveň svarových napětí, nebo zvládnutí napětíového stavu tak, aby se napětí navzájem eliminovala. [8]

2.2.2 Požadované vlastnosti svarového spoje

Pokud od svarového spoje očekáváme přibližně stejné vlastnosti, jako má svařovaný materiál, musí mít svarový kov strukturu litiny. Svařujeme tedy výhradně plamenem nebo elektrickým obloukem s přídavným materiálem z litiny za vysokých teplot přehřevu 600 – 650 °C s pomalým ohřevem – řízené ochlazování. Pokud ovšem nevyžadujeme stejné vlastnosti, můžeme použít přídavný materiál jiného složení než má svařovaná litina.

Jeho konkrétní složení se volí tak, aby se ve svarovém kovu a hlavně na hranici natavení nenacházel uhlík ve formě cementitu – ledeburitu. Toho se docílí použitím elektrody vyrobené z tzv. grafitizačních prvků – niklu, mědi, uhlíku. [4, 8]

2.2.3 Přídavné materiály

V podstatě zde používáme dva druhy přídavných materiálů. Jednak takové, které po vytavení dávají jako svarový kov litinu totožnou se základním materiálem - ty se používají u svařování plamenem a elektrickým obloukem. Dále ty, jejichž svarový kov se podstatně liší od litiny – hlavní legurou bývá měď a nikl. Tyto se používají převážně u svařování elektrickým obloukem. Při opravách litinových výrobků je výhodné použít metodu TIG s přídavným materiálem v podobě litinové tyčinky. [2, 8]

2.2.4 Metody svařování

Mezi nejčastěji používané metody svařování litiny patří:

- a, svařování plamenem litinovými tyčinkami
- b, svařování elektrickým obloukem obalenou elektrodou nebo litou tyčinkou
- c, svařování uhlíkovou elektrodou a litou tyčinkou
- d, svařování elektrickým obloukem netavící se elektrodou – metoda 141
- e, svařování elektrickým obloukem tavící se elektrodou v aktivním plynu – metoda 135

2.2.5 Tepléné zpracování svařenců

Svařovat litinu můžeme:

- a, za vysokých teplot předehřevu 550 – 650°C
- b, za teplot předehřevu 150 – 450°C
- c, bez předehřevu

2.2.6 Subjektivní vliv svářeče

Svařování litin vyžaduje přesnější dodržování zásad svařování vzhledem k odlišným fyzikálním vlastnostem litin od ocelí. [8]

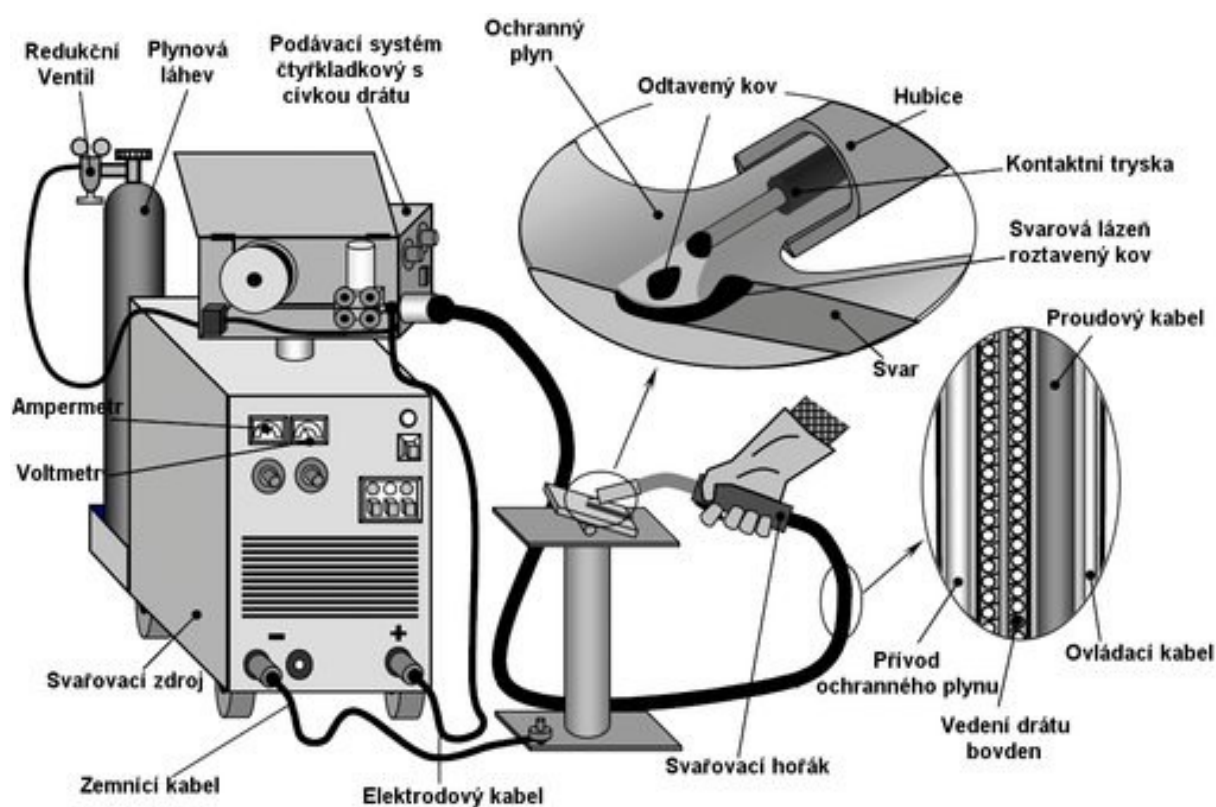
3. Oduhličení

Oduhličení povrchu vzniká ochuzením povrchové vrstvy o uhlík. Nejnižší obsah uhlíku je u povrchu a zvětšuje se směrem do materiálu. S tím se mění i mikrostruktura. V oblasti úplně ochuzené o uhlík je struktura feritická, v oblastí částečně ochuzené je smíšená. V ní se podíl feritu se stoupajícím obsahem uhlíku zmenšuje až do hloubky, ve které struktura odpovídá uhlíku dané oceli a příslušnému zpracování (perlit, bainit, martensit apod.) K oduhličení dochází především při ohřevech oceli na vyšší teploty. Proto oduhličování úzce souvisí se vznikem okují (okysličování). Rychlosti těchto jevů závisí především na teplotě, obsahu O_2 , CO_2 , H_2 v okolní atmosféře, rychlosti ohřevu, době setrvání na teplotě a složení oceli. Při oduhličování dochází k nežádoucím změnám vlastností, jako např. ke snížení tvrdosti, pevnosti apod. v dané oblasti. [9]

4. Popis metod svařování

4.1 Metoda 135 – obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu

Jedná se o velmi rozšířenou metodu tavného svařování, která se označuje jako metoda 135. Principem je hoření oblouku mezi koncem tavící se elektrody a základním materiálem v prostředí aktivního ochranného plynu, kterým může být CO_2 , $\text{Ar}+\text{CO}_2$, $\text{Ar}+\text{CO}_2+\text{O}_2$. Tím je svarová lázeň a tepelně ovlivněná oblast chráněna před nepříznivým vlivem především kyslíku a dusíku, jenž se vyskytuje v okolní atmosféře. Schéma metody 135 je uvedeno na obrázku č. 1. [2]



Obr. 1 Schéma metody 135 [1]

Kromě metody 135, kde se používá aktivní plyn (nejčastěji CO_2) existuje i metoda 131 kde se používá inertní plyn (argon, helium). Z konstrukčního hlediska je zařízení pro svařování metodami 135 a 131 téměř stejné, rozdíl je pouze v použitém ochranném plynu. Způsob přenosu kovu v oblouku je při těchto metodách buď zkratový, polozkratový, kapkový bezzkratový, sprchový, impulsní nebo přenos rotujícím obloukem. Zkratový přenos je často nazýván jako svařování krátkým obloukem a je doprovázen rozstříkem kovu. Realizuje se při nízkém napětí na oblouku 14 až 20 V a je vhodný pro svařování tenkých plechů,

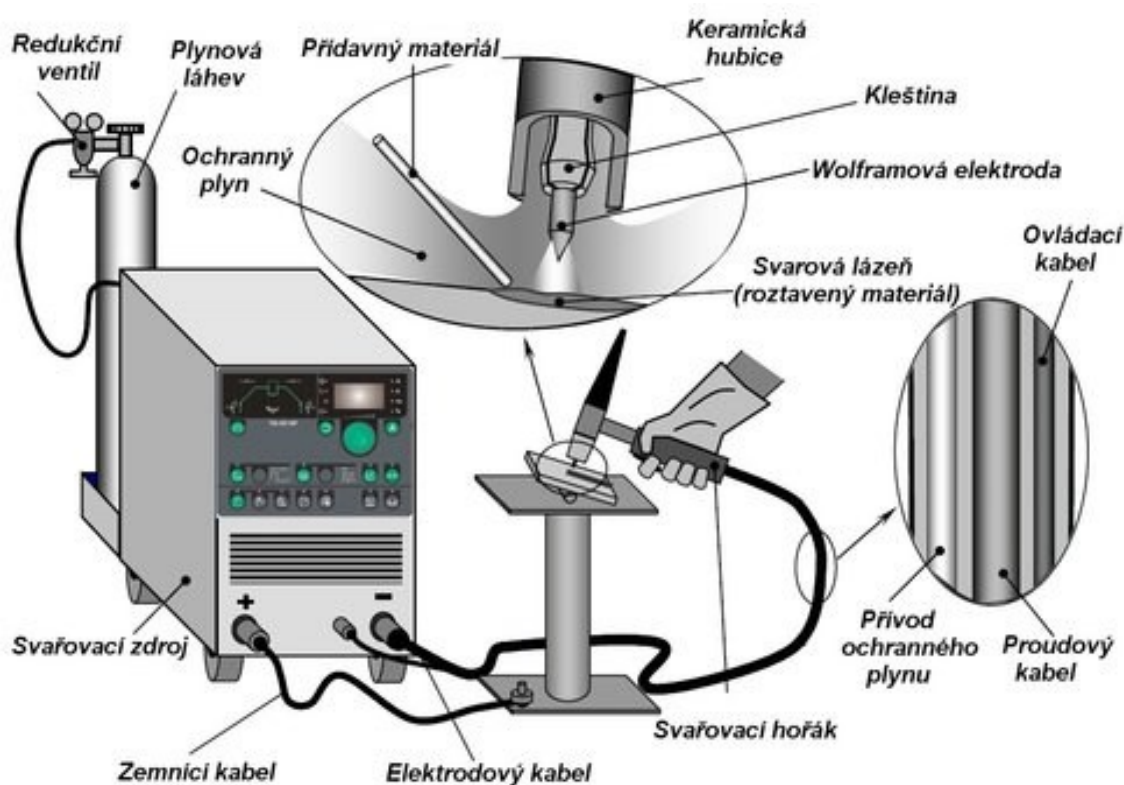
na svařování v polohách a na provádění kořenových vrstev. Polozkratový přenos je doprovázen malým rozstřikem kovu, a je realizovatelný při středním napětí na oblouku v rozsahu 18 až 28 V. Drát se zde odtavuje převážně ve formě kapek větších rozměrů. Tento způsob je využíván především při svařování plechů středních tloušťek. [2]

Kapkový bezzkratový přenos se označuje také jako svařování dlouhým obloukem a dosahuje se ho při větším napětí na oblouku v rozsahu 25 až 35 V. Jeho použití je při svařování hliníku a jeho slitin velkých tloušťek většími průměry svařovacích drátů metodou 131 a při svařování ocelí větších tloušťek ve směsích Ar + CO₂ metodou 135. Sprchový přenos je realizován ve formě malých kapek kovu. Jedná se o stabilní proces a je prakticky bez rozstřiku. Je dosažen vysokým tepelným příkonem při vysoké proudové hustotě svařovacího proudu a je nutné použití směsných plynů na bázi argonu. Využití je při svařování kovových materiálů větších tloušťek. Impulsní přenos je kombinovaný kapkový a sprchový přenos kovu. Je charakterizován přenosem kovu, ve formě kapek, který je velmi stabilní a prakticky bez rozstřiku. Využívá se v širokém rozsahu tepelných příkonů, a přenos je realizován při pulzujícím proudu, pravidelně se měnícím mezi hladinou základního a impulsního proudu. Vyžaduje plyny na bázi argonu. Použití je nejčastěji při svařování tenkých materiálů. Přenos rotujícím obloukem má vysoký tepelný příkon oblouku, který zabezpečuje vysokou produktivitu svařování vysokými rychlostmi metodou 131. Používá se zde výlučně jen ve směsných plynech na bázi argonu s vysokým obsahem hélia. Jeho použití je především při strojním svařování ocelí s velkou tloušťkou. [2, 4]

Výhodou této metody oproti jiným metodám obloukového svařování je vysoká produktivita a hospodárnost provedených spojů, možnost rychlé změny svařovacích parametrů, dobrá operativnost i při svařování v polohách, není nutné používání tavidel, je vhodné jak pro ruční, tak automatizované svařování, má širokou dostupnost svářečské techniky, přídavných materiálů a technických plynů a má také nízké investiční náklady na vybavení. [2]

4.2 Metoda 141 – obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu

Principem je zde hoření oblouku mezi netavící se wolframovou elektrodou a základním materiálem. Jeho délka je regulována napětovou regulací. Tato metoda se používá pro ruční i automatické svařování i navařování. Přídavný materiál jde zde dodáván buď ručně ve formě drátu, tyčinky nebo pásku, nebo v případě automatického svařování podávacím mechanismem. Svařovací proud může být buď stejnosměrný pro středně a vysoce legovanou ocel, měď, titan, nikl a další nebo střídavý pro hliník, hořčík či jeho slitiny. Svarová lázeň je zde před účinky atmosféry chráněna inertním plynem – argonem, héliem nebo jejich směsí přiváděným podél osy wolframové elektrody a usměrněna keramickou hubicí do místa svaru. Schéma této metody je na obrázku č. 2. [2, 3]



Obr. 2 Schéma metody 141 [7]

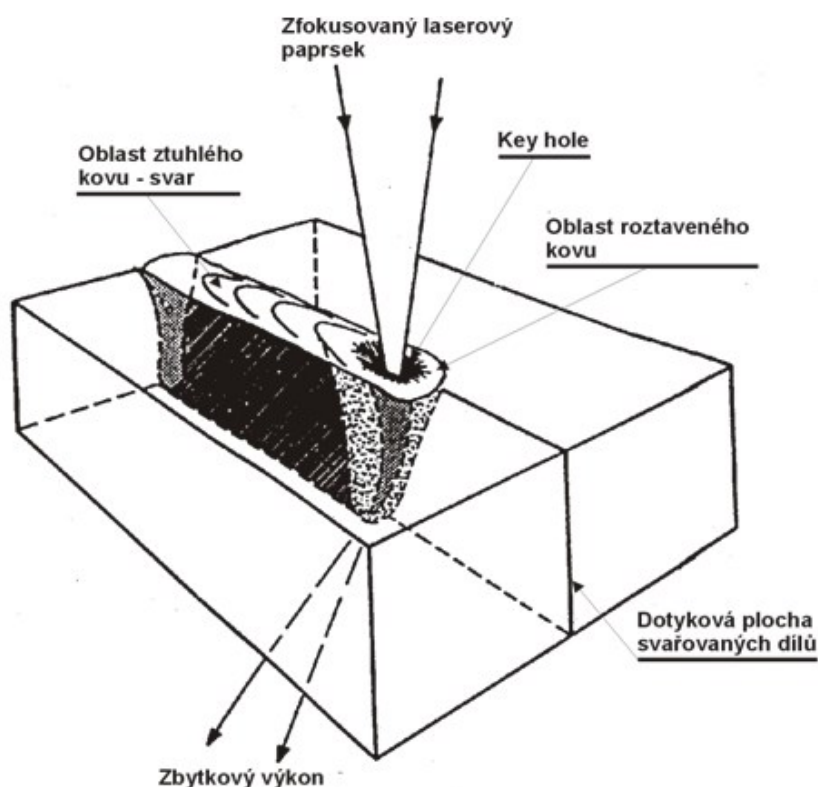
Na rozdíl od jiných metod zde nedochází k neustálému přísunu přídavného materiálu, což znamená lepší ovlivňování svarové lázně oproti jiným metodám. Mezi další výhody lze zařadit i možnost svařování bez přídavného materiálu, což zajistí stejné chemické složení svarového kovu jako základního materiálu. Přisun tepla lze efektivně regulovat a díky úzkému teplotnímu poli je zde malá teplotně ovlivněná oblast a tím i malé deformace. Použití inertních plynů zabezpečuje efektivní ochranu svarové lázně a zabraňuje propalu a tím

i vzniku strusky. Díky možnosti použití velmi malých proudů v řádech jednotek ampér se tato metoda hodí i na svařování tenkých materiálů. Nevýhodou této metody je vyšší náročnost na svařovací zařízení – kvůli větší složitosti jsou dražší. [2, 3]

4.3 Metoda 52 – Laserové svařování

Tato metoda využívá energie monochromatického (jednobarevného) koherentního (má stejný směr, frekvenci a fázi) světelného paprsku, který je soustředěn do úzkého svazku a opticky zaostřen do ohniska, jenž má miniaturní rozměry. Tím je dosaženo vysoké koncentrace energie a tím i vysokých teplot čímž dochází k tomu, že rychlost ohřevu materiálu je mnohonásobně vyšší než odvod tepla do okolí. Dojde zde k lokálnímu ohřevu dané oblasti a při vhodném zkombinování svařovacích parametrů dochází k efektu „klíčové dírky“ (anglicky key hole). [3]

Schéma této metody je na obrázku č. 3.



Obr. 3 Schéma metody 52 [3]

Rozdělení laserů dle dodávání paprsku je na pulzní a kontinuální. Pulzní lasery dodávají laserový paprsek ve formě krátkodobých pulzů a jsou vhodné především pro bodové svařování. Naproti tomu kontinuální lasery jsou vhodné pro tupé a přeplátované spoje délky i několika metrů. Zatímco pulzní lasery mají výkon 20 až 500 W, kontinuální se vyrábí ve výkonech 380 až 15 000 W. [4, 5]

Jiné rozdělení laserů je dle použitého aktivního prostředí na pevnolátkové a plynové. Pevnolátkové lasery se zdrojem energie z výbojky využívají jako aktivní prostředí monokrystal Nd:YAG a díky vlnové délce paprsků $\lambda = 1027 \text{ } \mu\text{m}$ je možné jej přenášet optickým kabelem, čímž se zjednodušuje zavedení do těžko přístupných míst. Lasery se zdrojem energie z diod pak používají monokrystal Yb:YAG. V případě plynových laserů je pak aktivní prostředí směs $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-He}$ a zde je na rozdíl od přechodného typu možno přenášet paprsek pouze soustavou zrcadel, nikoliv optickým kabelem což je způsobeno vlnovou délkou paprsku $\lambda = 10,6 \text{ } \mu\text{m}$. Další nevýhodou tohoto typu je také vznik plazmatu (ohřátím vzduchu při svařování), který absorbuje energii laseru a zabrání paprsku dostat se na povrch součásti. Řešením je ofukování místa svařování vzduchem čímž dojde k vychýlení plazmatu. [5]

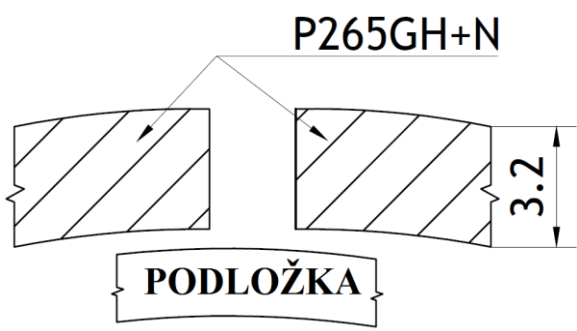
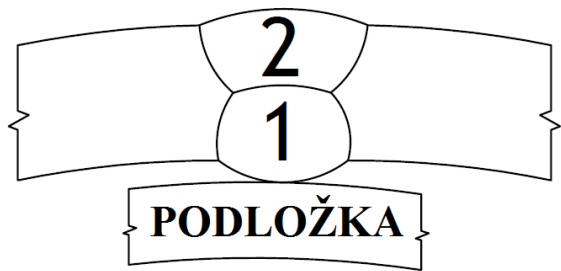
Mezi výhody této metody patří úzký svar s minimálně tepelně ovlivněnou oblastí, vysoká svařovací rychlost, malé deformace svařované součásti, možnost svařování bez přídavného materiálu, možnost pracovat s laserovým paprskem jako se světlem v prostředí normální vzdušné atmosféry – zavést jej do těžko přístupných nebo vzdálených míst. [4, 5]

Mezi nevýhody patří vysoká cena svařovacího zařízení, která vede k tomu, že v současnosti je tato metoda rozšířena především v hromadné výrobě.

5. Návrh postupu svařování

Některé bližší informace ohledně svařovaných součástí nebudou v práci blíže popsány z důvodu, že výrobce si nepřál tyto vlastnosti zveřejnit.

Vybraná součást je trubka, vytvořená skružením plechu o tloušťce 3,2 mm na průměr 118,4 mm a výšku 300 mm. Výroba technologií skružováním byla vybrána s ohledem na dané výrobní možnosti. Uvnitř trubky je přivařená litinová součást, která tvoří podložku pro zvolený svar. Detail úpravy hran je uveden v tabulce č. 1.

Návrh spoje	Sled svařování
	

Tab. 1 Detail svaru

Jde o I svar s podložkou v podobě litinové součásti, svařovaný v poloze PC. Nejprve se provede dělení plechu na délku 372 mm a šířku 300 mm. Poté se upraví hrany broušením. Následuje skružení plechu na vnější průměr 118,4 mm. Svarové plochy musí být očištěné, odmaštěné, bez rzi a okují. Samotné svařování se provede metodou 135 s parametry uvedenými v tabulce č. 2.

Svarová vrstva	Průměr svař. drátu [mm]	Proud [A]	Napětí [V]	Rychlost [m/s]	Polarita
1	Ø 1,2	210 – 215	22 – 23	1,4	DC+
2	Ø 1,2	195 – 200	22 – 23	1,4	DC+

Tab. 2 Svařovací parametry

Jako přídatný materiál bude použit svařovací drát ESAB ARISTOROD 12.50, jehož složení je uvedeno v tabulce č. 3.

Chem. prvek	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
%	0,077	1,49	0,91	0,008	0,008	0,03	0,01
	Mo	V	Nb	Cu	As	Sn	Al
	0,003	0,001	0,006	0,015	0,002	0,001	0,002
	Ti	Co	N	Ta	O	Zr+Ti	
	0,002	0,005	0,0059	0,01	0,0061	0,004	

Tab. 3 Chemické složení přídavného materiálu

Jako ochranný plyn bude použit Linde Corgon 18 ve směsi 82% Ar + 18% CO₂.

Nejprve se provede housenka č. 1, čímž dojde ke spojení plechu do podoby trubky, poté je provedeno připojení litinové součásti ve výšce 150 mm čtyřmi bodovými průvarovými svary. Nakonec je provedena housenka č. 2.

Další možností jak danou část kompresoru svařit by bylo použití metody 141 - obloukovým svařováním wolframovou elektrodou v inertním plynu, nebo metodou 52 – laserem. Druhá zmíněná metoda by zajistila menší teplotní ovlivnění materiálů, a tak by se dal předpokládat menší výskyt vad. Nevýhodou je ovšem cena takovýchto zařízení a jimi provedených svarů.

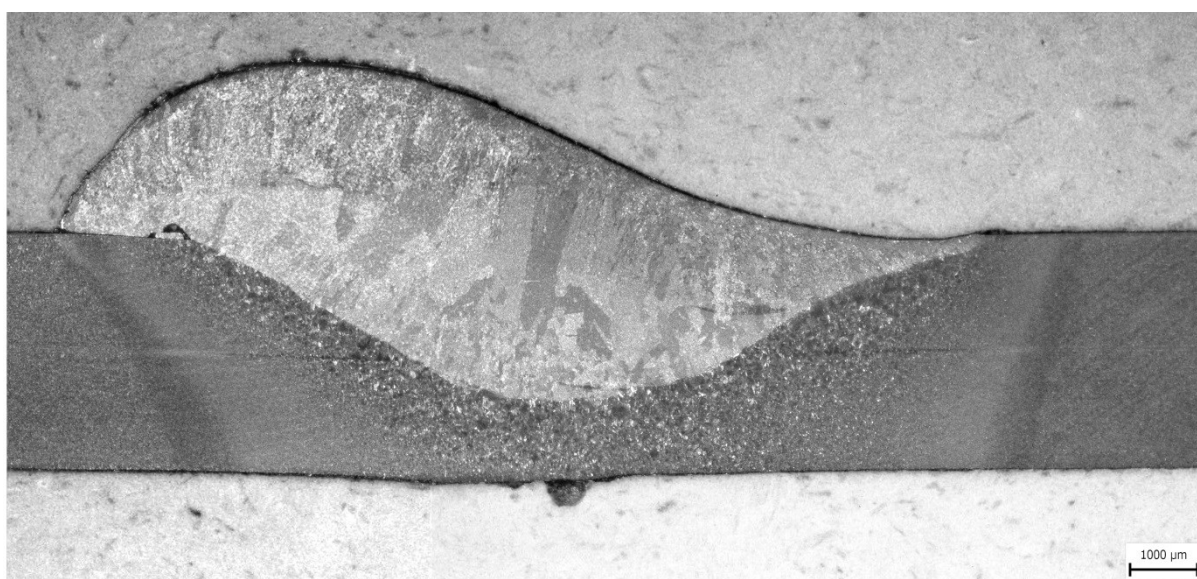
6. Ověření vlastností svarových spojů

Zkoumány byly 4 ks vzorků označené 2A, 2B, 2C a 2D. Vzorky byly připraveny v metalografické laboratoři na metalografické brusce Struers TegraPol-35 broušením za mokra. Dokumentace byla provedena pomocí světelné mikroskopie na zařízení Neophot 21 s pomocí softwaru Quick Photo Industrial 3.0. U vzorku 2A se při přípravě odbrousila kořenová část, lze však předpokládat, že bude mít stejné vlastnosti jako kořen u zbývajících vzorků, který má podobný charakter. Všechny zkoušky byly prováděny v souladu s normou ČSN EN ISO 15614-1.

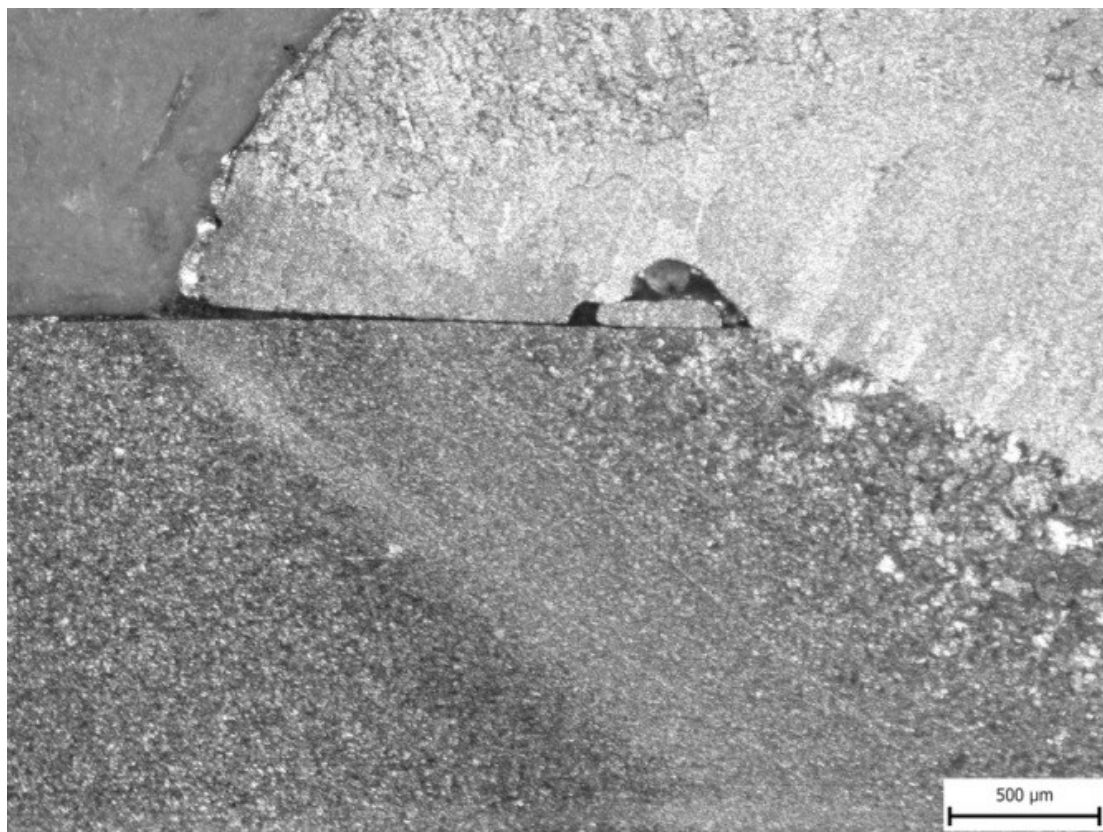
6.1 Makroskopické šetření

Detailní snímky všech vzorků včetně popisu jednotlivých vad jsou uvedeny na obrázcích 4 až 12. Leptání bylo provedeno Nitemem.

Vzorek 2A:

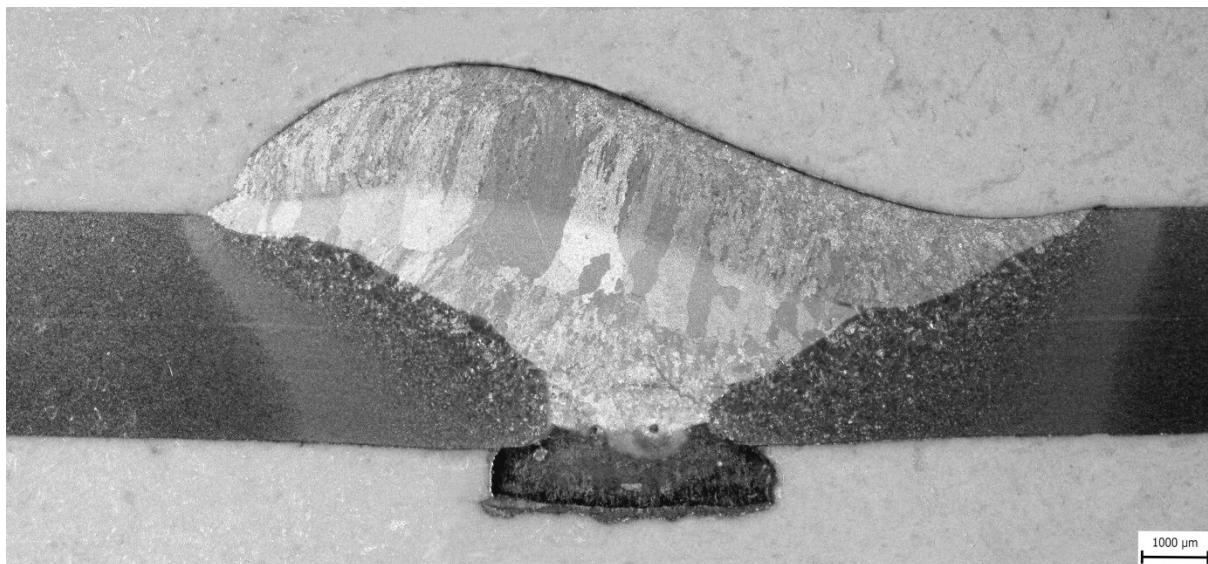


Obr. 4 Makrostruktura vzorku 2A - vady charakteru přetečení materiálu a vměstek – hlinitan - umístěný v polovině tloušťky svaru

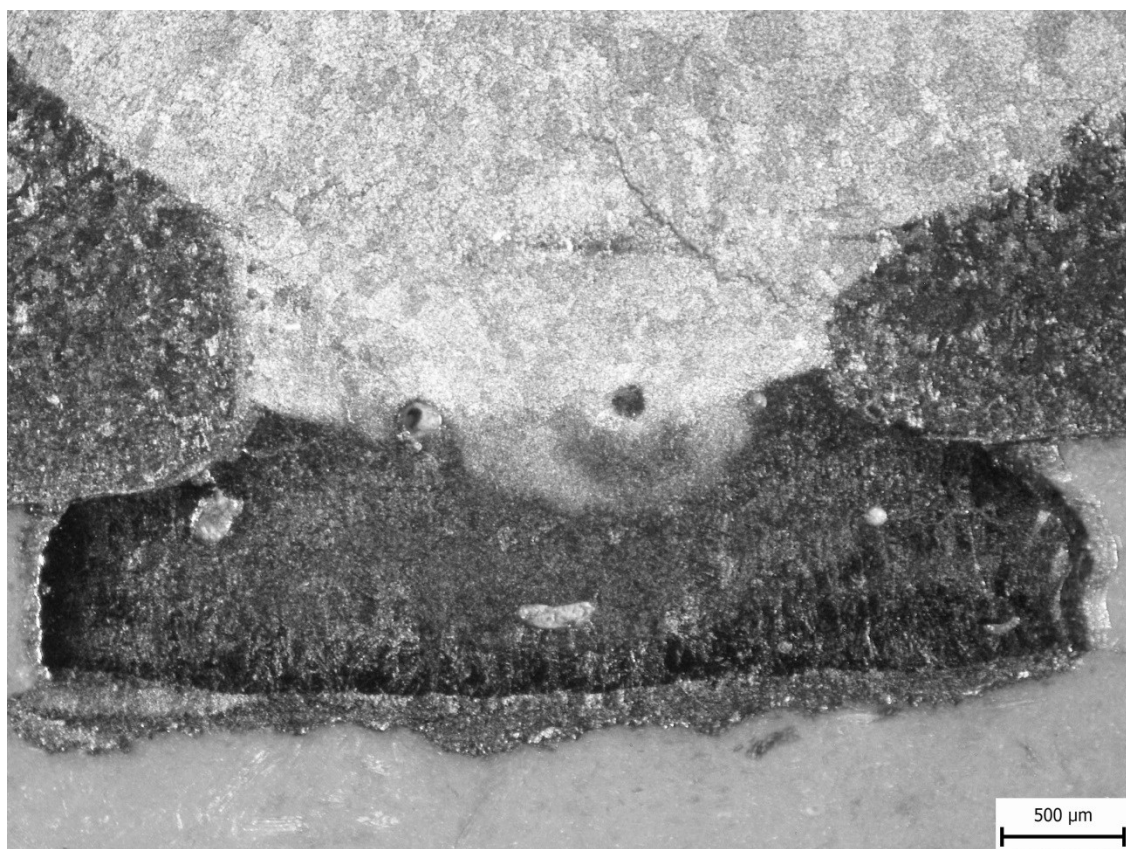


Obr. 5 Makrostruktura vzorku 2A – detail vady

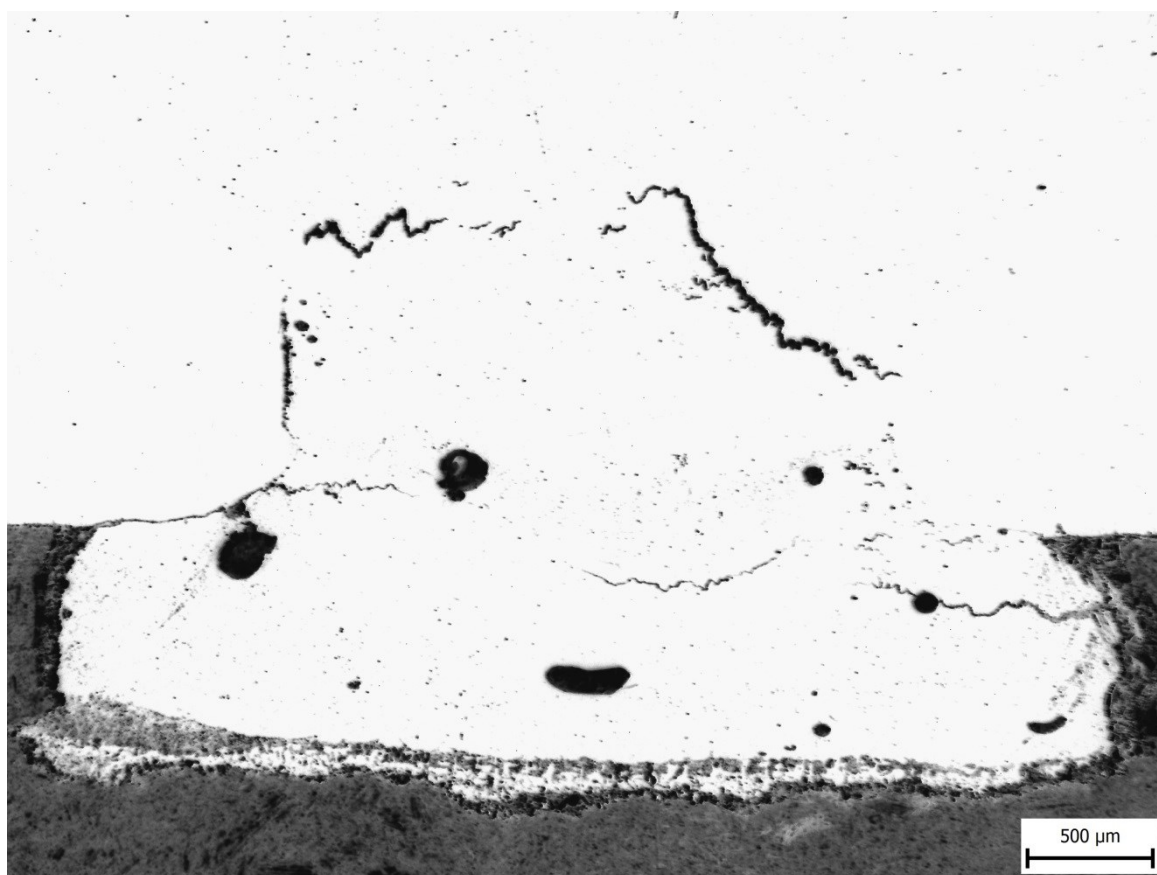
Vzorek 2B:



Obr. 6 Makrostruktura vzorku 2B, trhliny a póry v oblasti kořene svaru, studený spoj

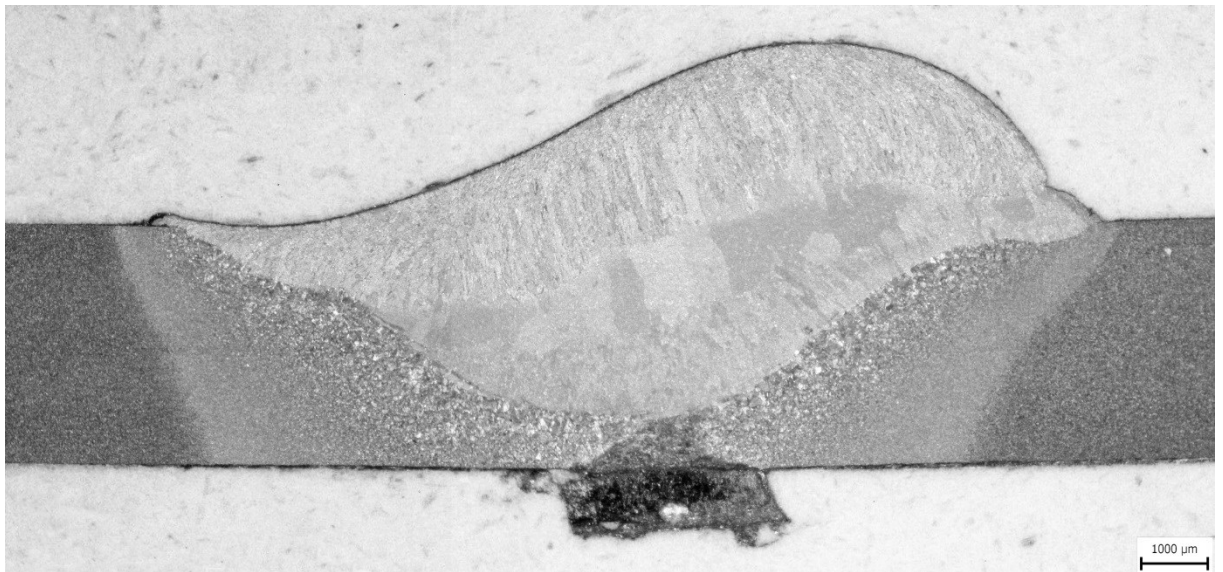


Obr. 7 Makrostruktura vzorku 2B, detail oblasti kořene



Obr. 8 Makrostruktura vzorku 2B, detail oblasti kořene v neleptaném stavu

Vzorek 2C:

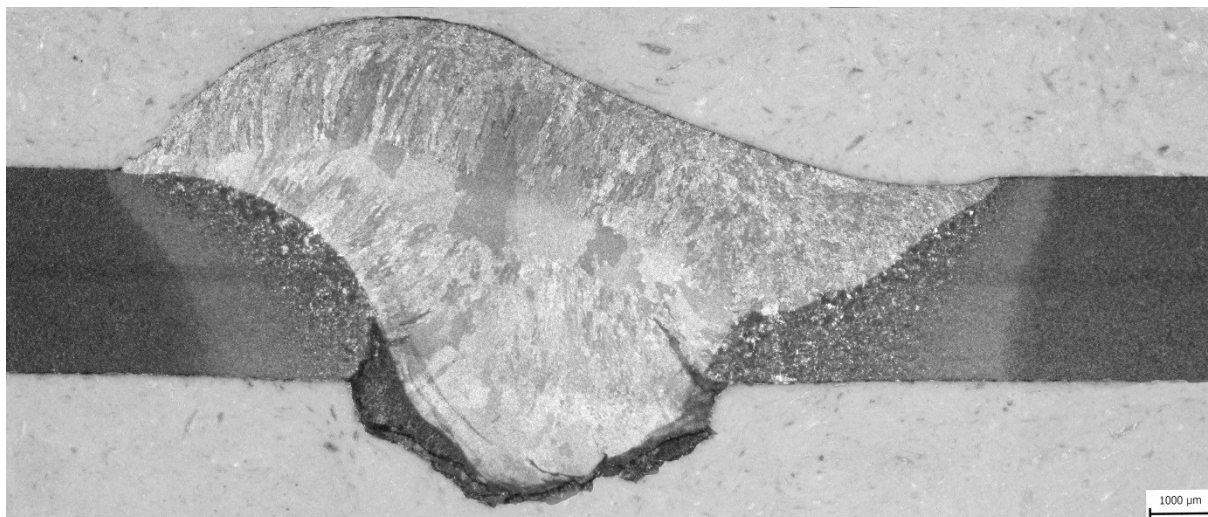


Obr. 9 Makrostruktura vzorku 2C, četné trhliny a póry v oblasti kořene svaru

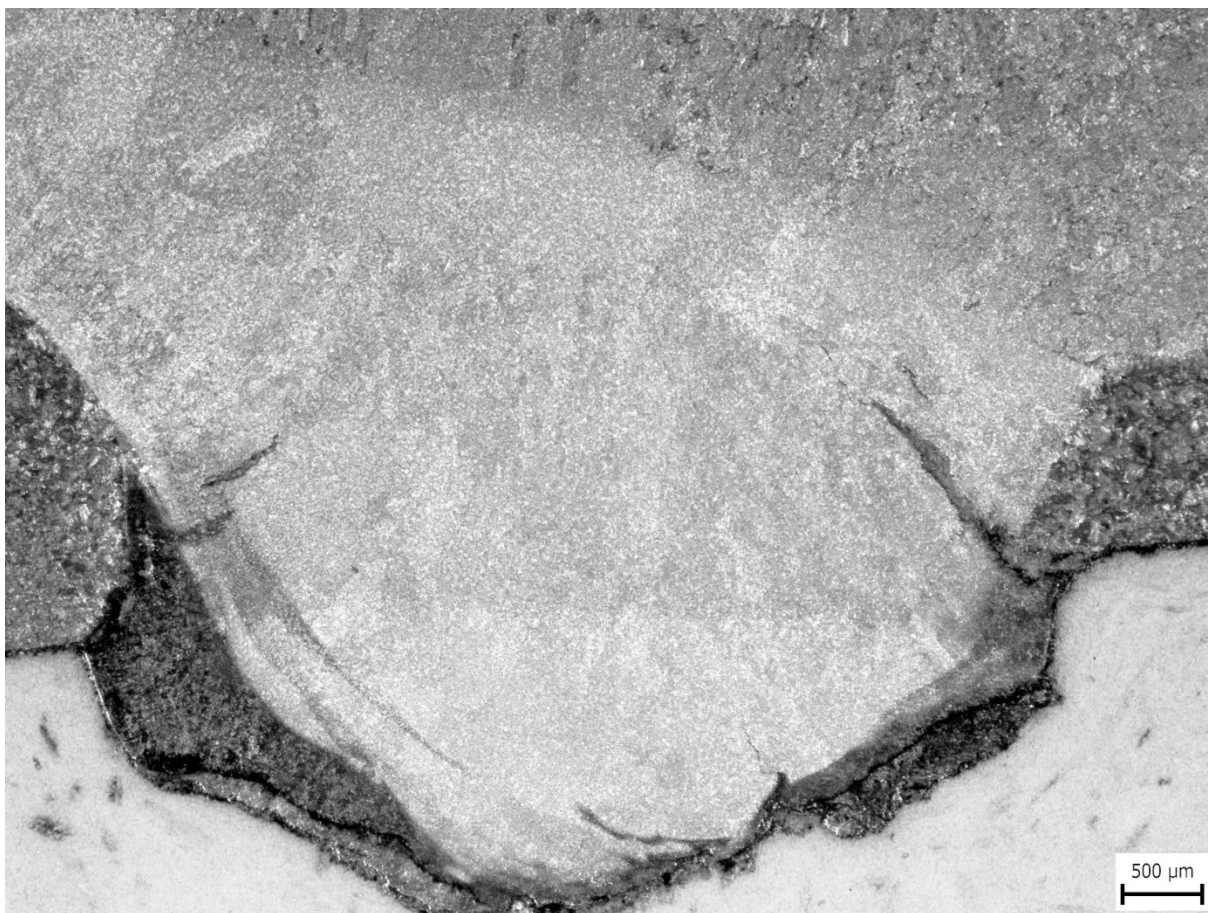


Obr. 10 Makrostruktura vzorku 2C, detail oblasti kořene

Vzorek 2D:



Obr. 11 Makrostruktura vzorku 2D, trhliny v oblasti kořene svaru, studený spoj



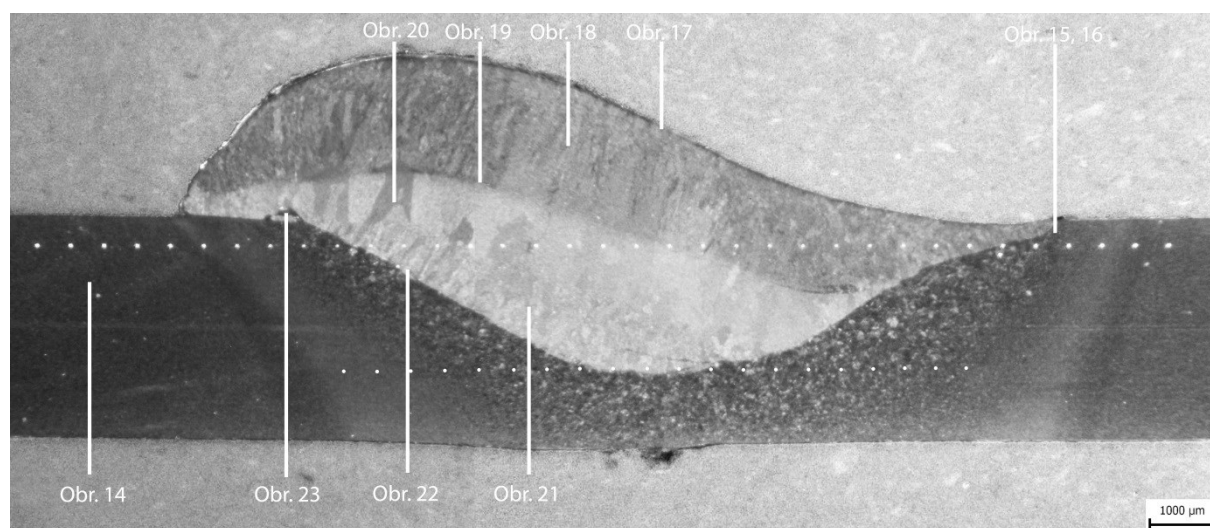
Obr. 12 Makrostruktura vzorku 2D, detail oblasti kořene

6.2 Mikroskopické šetření

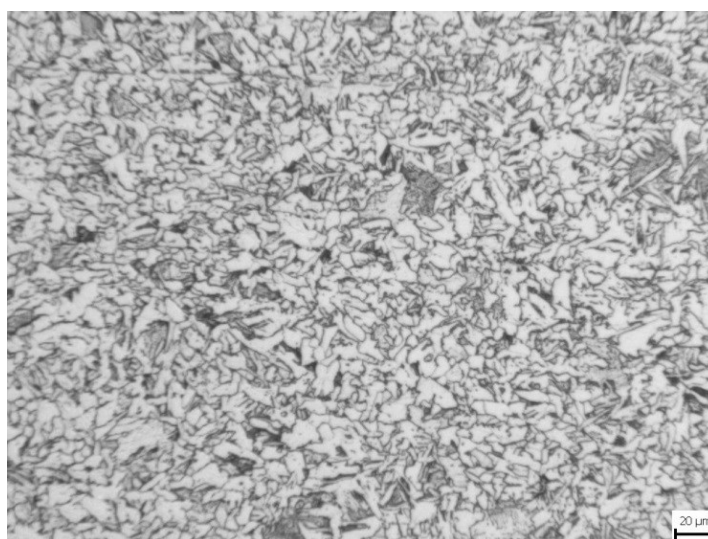
Vzorky byly opět připraveny v metalografické laboratoři na metalografické brusce Struers TegraPol-35 broušením za mokra. Vyvolání mikrostruktury bylo opět provedeno leptáním Nitalem. Následná dokumentace byla uskutečněna pomocí světelné mikroskopie na zařízení Neophot 21 za pomoci softwaru Quick Photo Industrial 3.0. Jednotlivé mikrostruktury všech vzorků včetně popisu jsou uvedeny na obrázcích 13 až 43.

Vzhledem k tomu, že mikrostruktury základního materiálu, nauhličené oblasti, hranice ztavení i svarových housenek je u všech čtyřech vzorků stejná, jejich bližší popis je uveden pouze u prvního vzorku 2A.

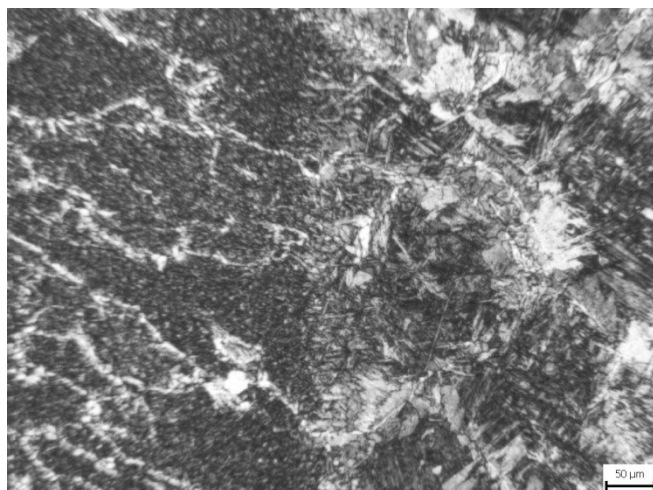
Vzorek 2A:



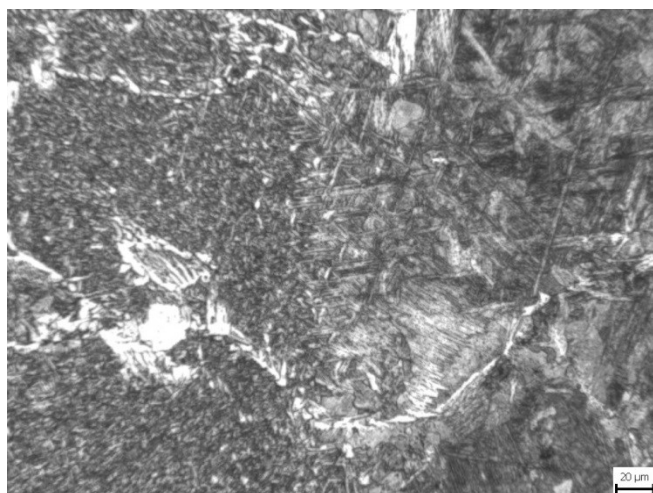
Obr. 13 Schéma detailů vzorku 2A



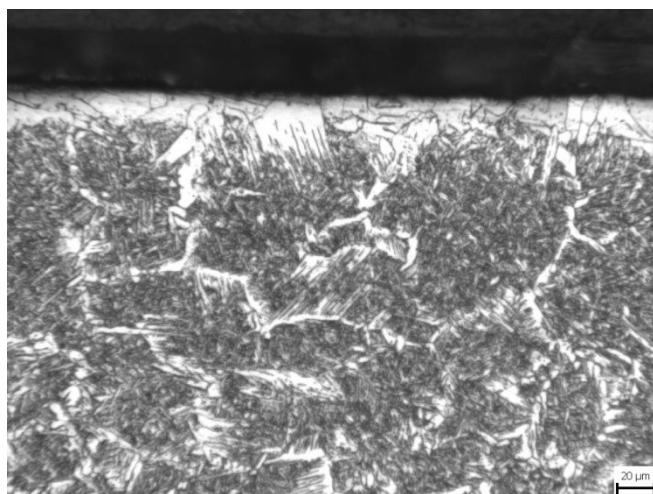
Obr. 14 Mikrostruktura základního materiálu vzorku 2A je perliticko-bainiticko-feritická
popuštěná



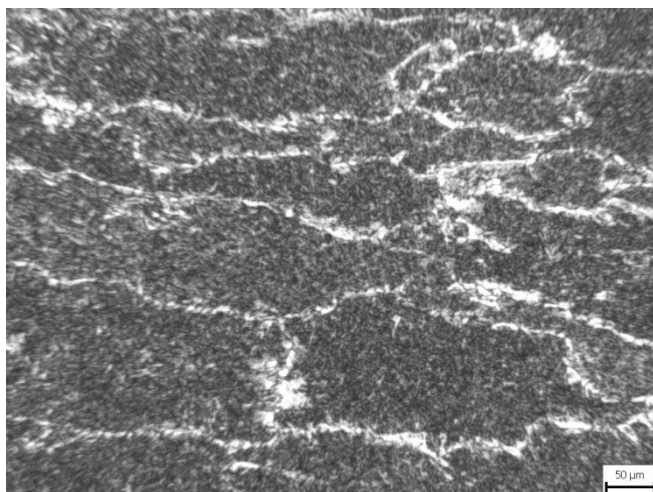
Obr. 15 Mikrostruktura na hranici ztavení vzorku 2A je tvořena směsicí popuštěných základních struktur a ojediněle vyloučeným feritem



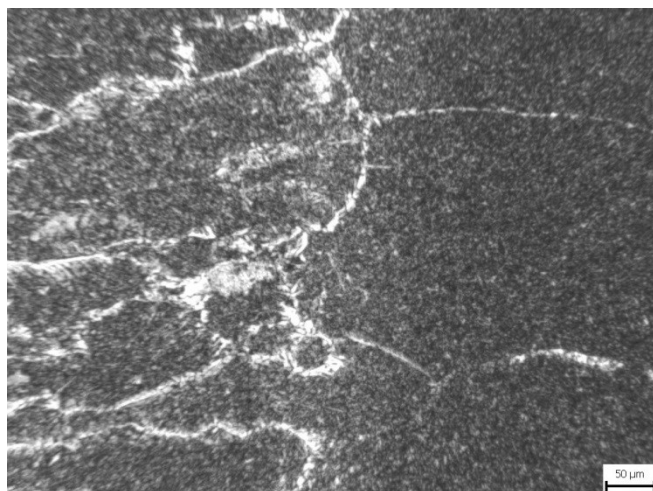
Obr. 16 Detail mikrostruktury na hranici ztavení vzorku 2A



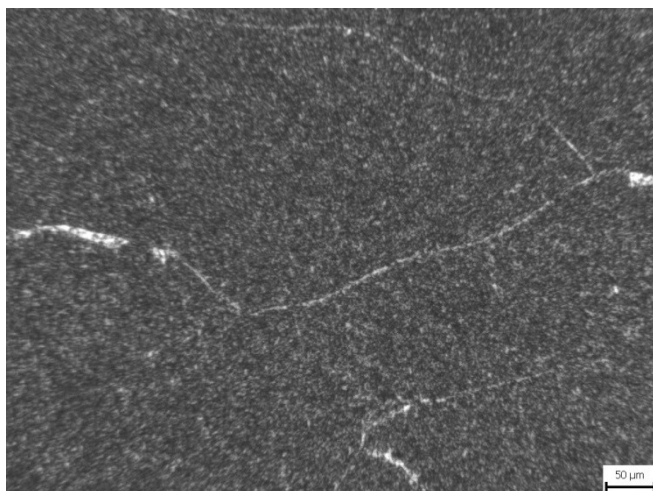
Obr. 17 Mikrostruktura na povrchu vzorku 2A je vykazující pásmo povrchového oduhličení



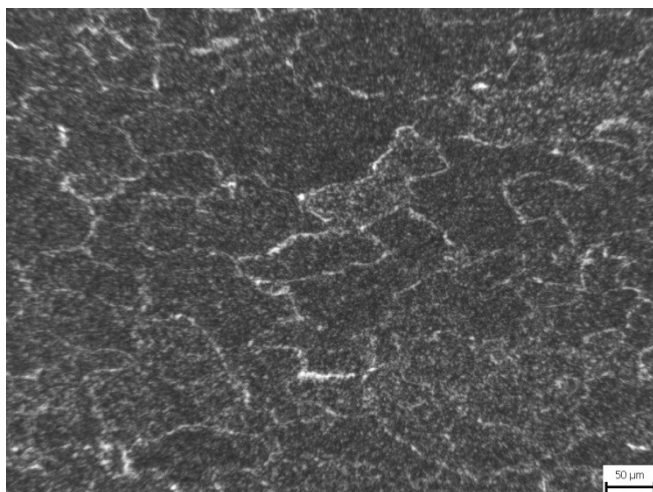
Obr. 18 Mikrostruktura svarového kovu krycí vrstvy vzorku 2A je lici, tvořena bainitem a feritem vytvářející souvislé síťový



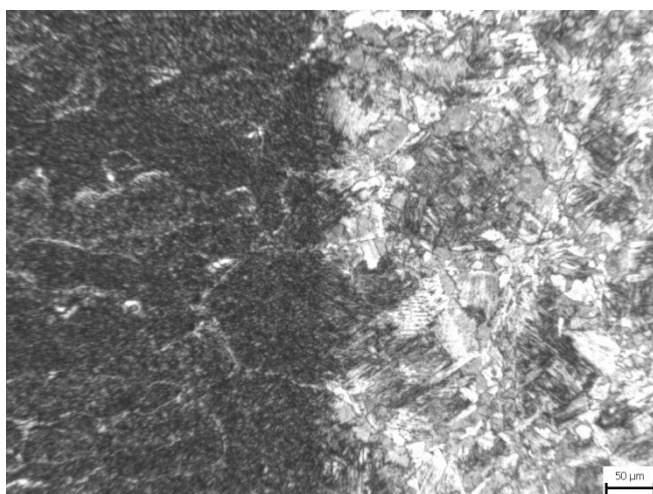
Obr. 19 Mikrostruktura vzorku 2A na hranici stavení housenek, bainitická s feritickým síťovým



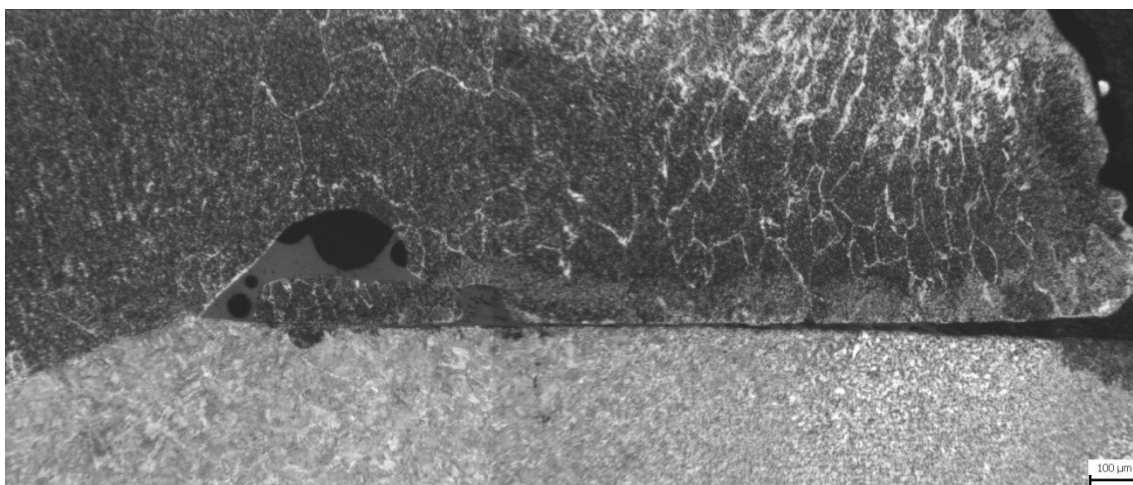
Obr. 20 Mikrostruktura podkladové housenky vzorku 2A je lici, tvořena popuštěným bainitem a feritem vytvářející síťový



Obr. 21 Rekrystalizovaná mikrostruktura podkladové housenky vzorku 2A



Obr. 22 Mikrostruktura hranice ztavení podkladové housenky vzorku 2A je bainitická, s ojedinělým výskytem feritu

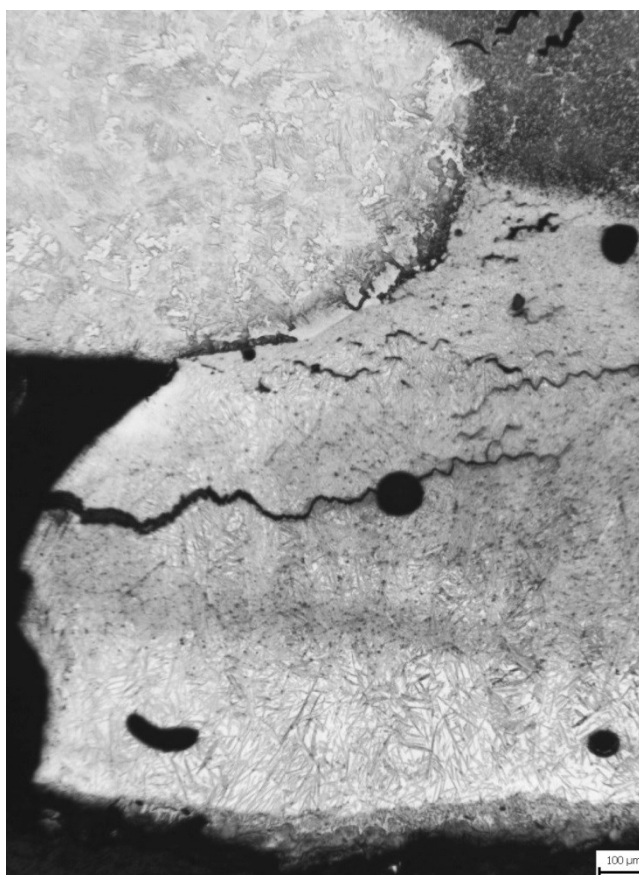


Obr. 23 Detail oblasti přetečení svarového kovu vzorku 2A

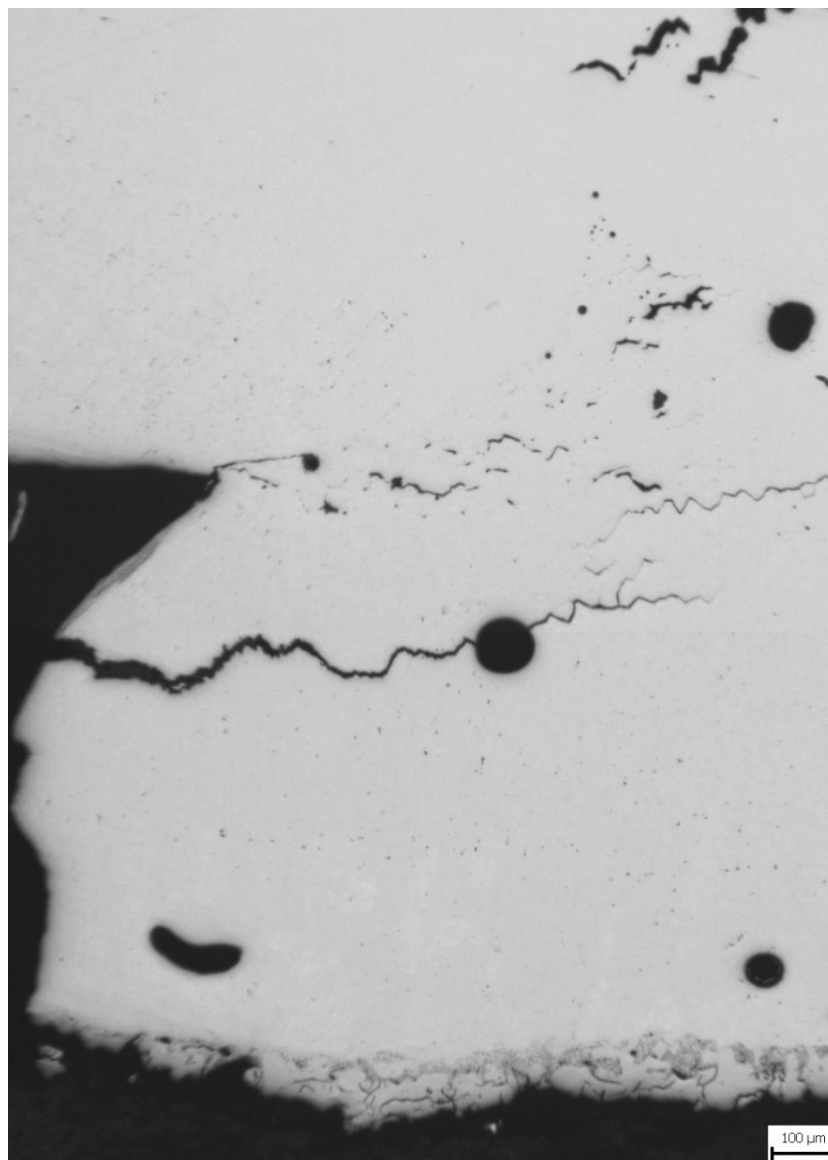
Vzorek 2B:



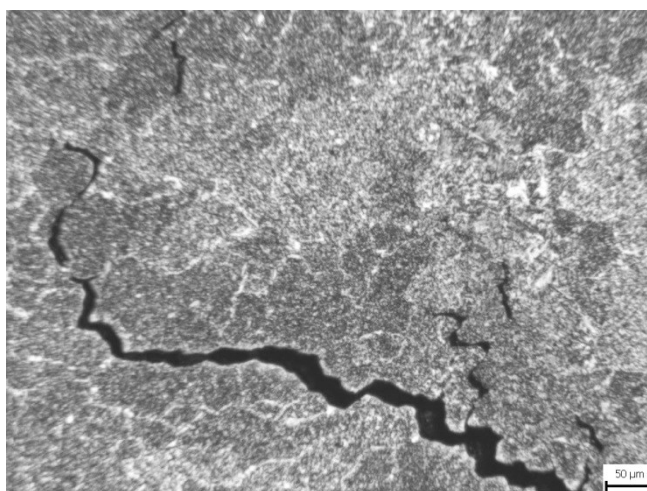
Obr. 24 Schéma vzorku 2B



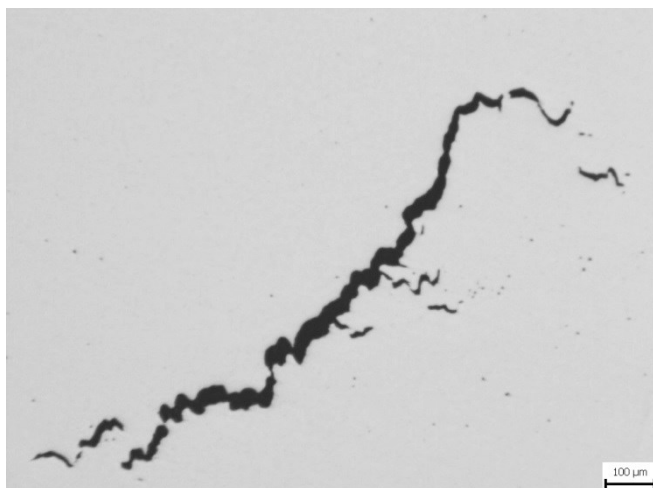
Obr. 25 V oblasti převýšení kořene vzorku 2B byly zjištěny oblasti, kde byla mikrostruktura tvořena lupínkovým grafitem, ledeburitem a martenzitem, pak jehlicovitý martenzit s velkým množstvím zbytkového austenitu který přecházel v čistě martenzitickou mikrostrukturu



Obr. 26 Oblast převýšení kořene vzorku 2B v nenaleptaném stavu



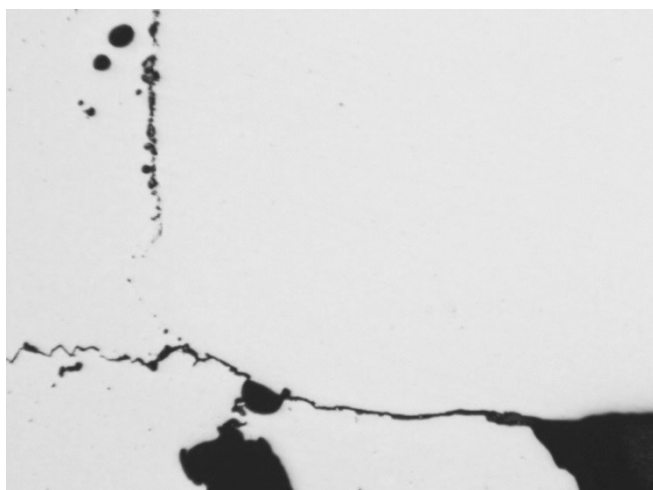
Obr. 27 Mikrostruktura vzorku 2B – detail interkrystalické trhliny



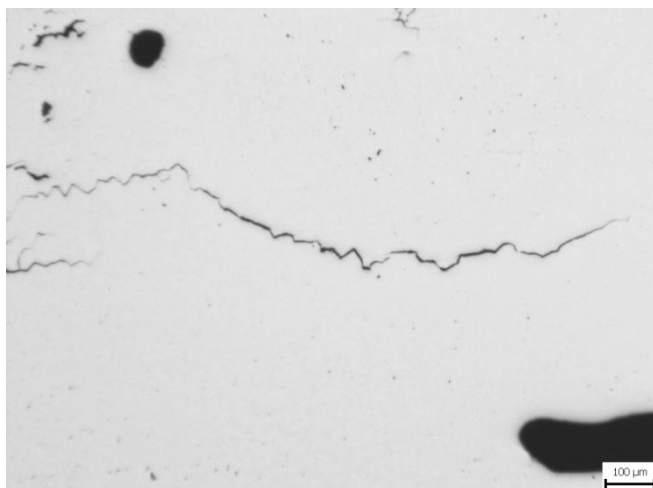
Obr. 28 Mikrostruktura vzorku 2B – detail interkrystalické trhliny v nenaleptaném stavu



Obr. 29 Mikrostruktura vzorku 2B – detail interkrystalické trhliny v nenaleptaném stavu

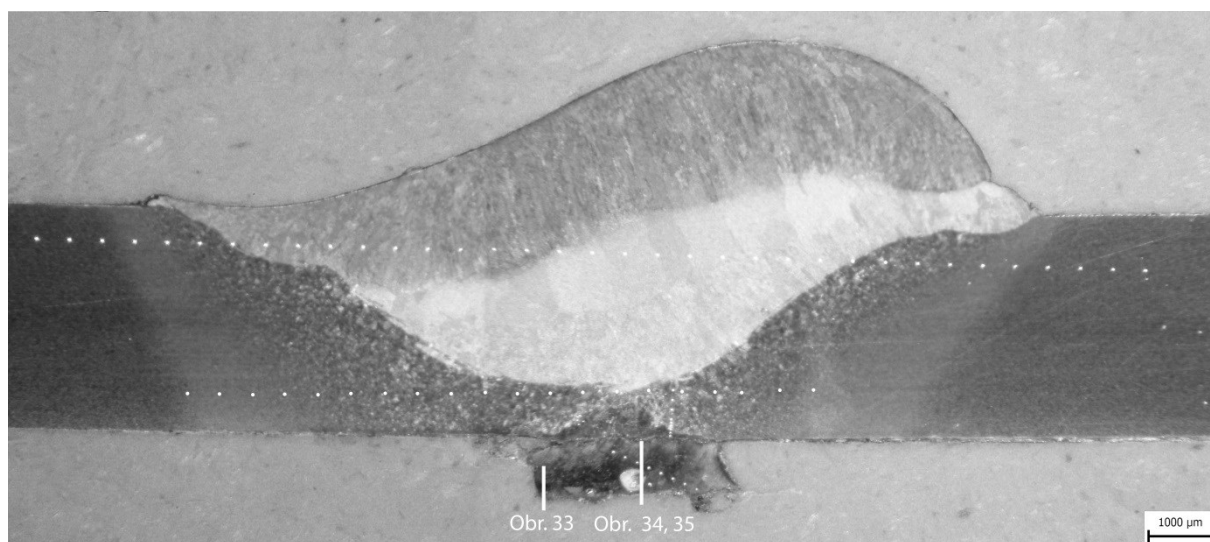


Obr. 30 Mikrostruktura vzorku 2B – detail interkrystalické trhliny v nenaleptaném stavu

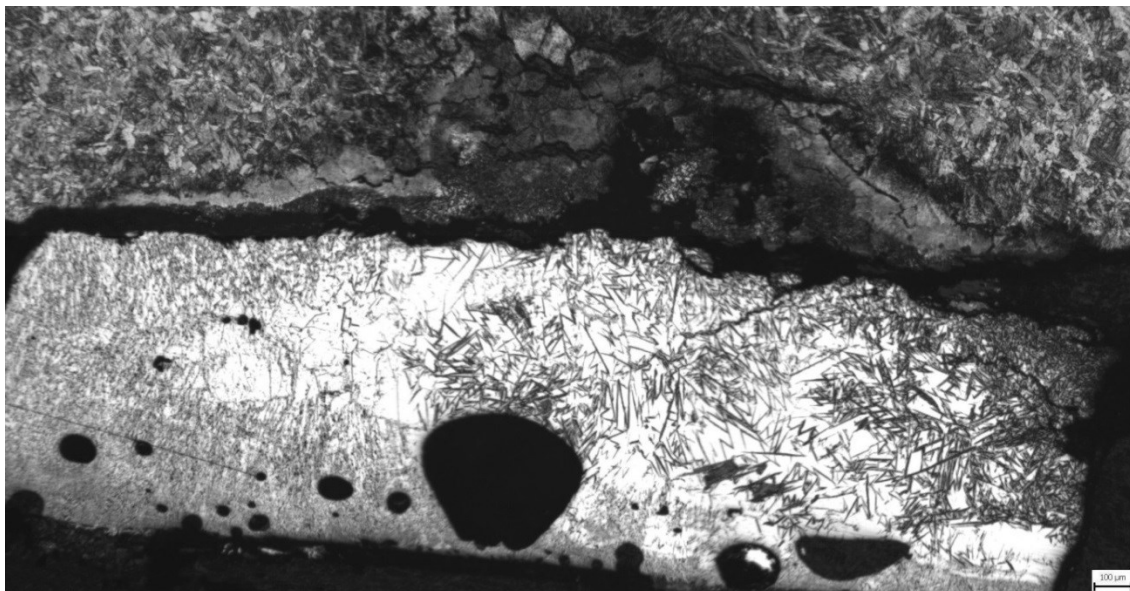


Obr. 31 Mikrostruktura vzorku 2B – detail interkrystalické trhliny v nenaleptaném stavu

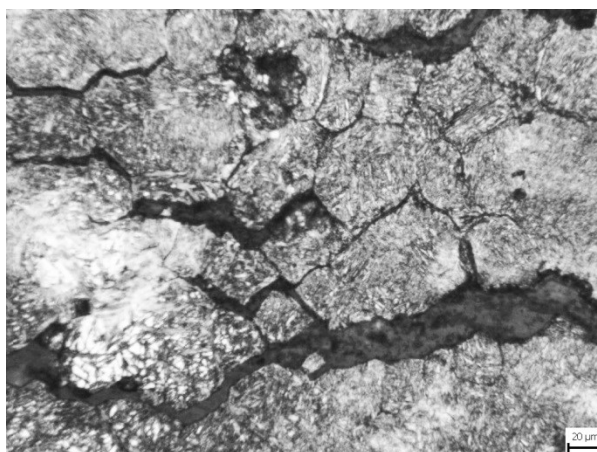
Vzorek 2C:



Obr. 32 Schéma detailů vzorku 2C



Obr. 33 V oblast převýšení kořene vzorku 2C byly kromě četných interkrystalických trhlin a dutin zjištěny oblasti kde mikrostruktura byla tvořena lupínkovým grafitem, ledeburitem a martenzitem, pak jehlicovitý martenzit s velkým množstvím zbytkového austenitu který místy přecházel v martenzitickou strukturu

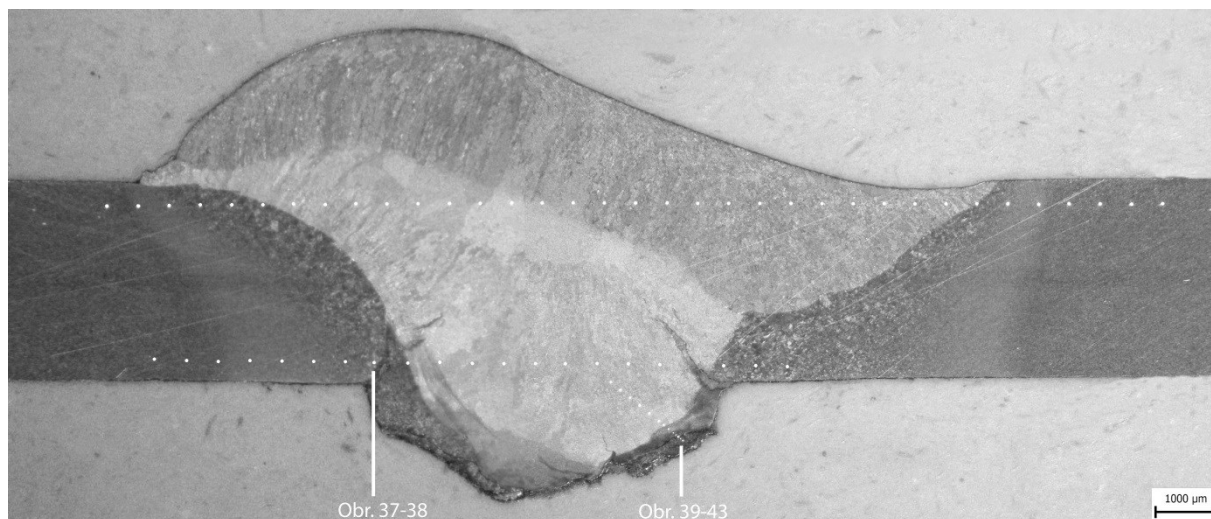


Obr. 34 Mikrostruktura vzorku 2C – detail interkrystalické trhliny

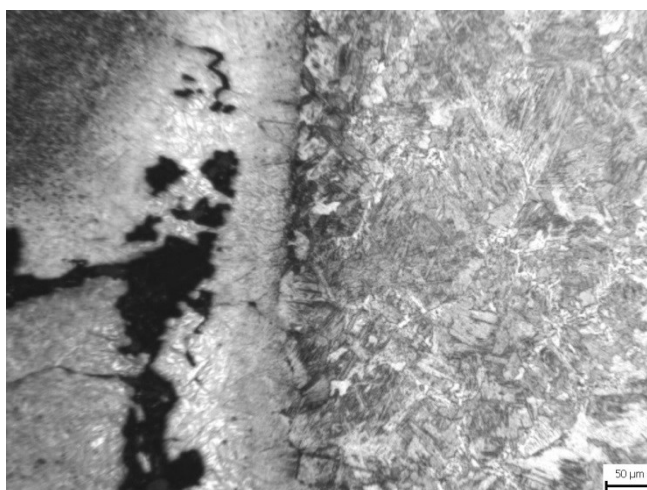


Obr. 35 Mikrostruktura převýšení kořene vzorku 2C je tvořená látkovým martenzitem a velkým množstvím zbytkového austenitu

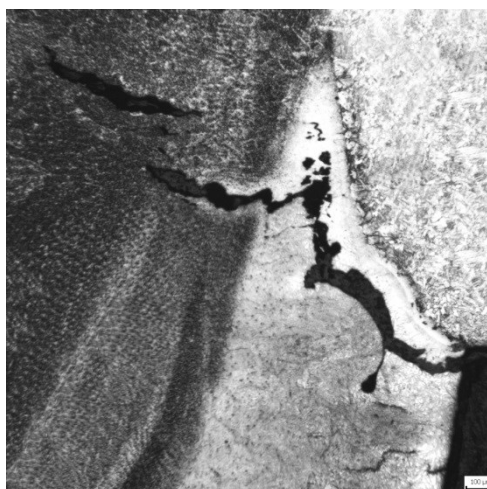
Vzorek 2D:



Obr. 36 Schéma detailů vzorku 2D



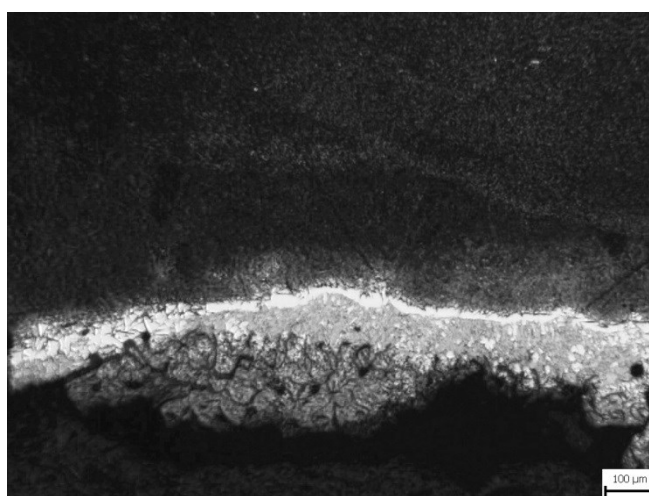
Obr. 37 Mikrostruktura vzorku 2D v oblasti kořene svaru, vada typu studený spoj
a interkrystalické trhliny



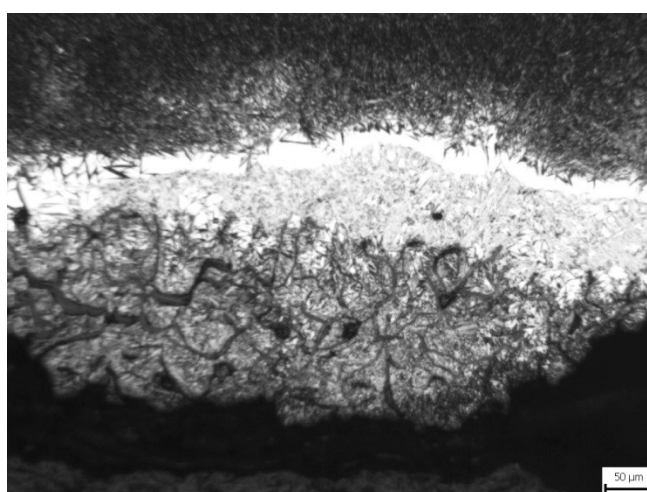
Obr. 38 Mikrostruktura vzorku 2D v oblasti kořene svaru, vady typu studený spoj
a interkrystalické trhliny v oblasti kořene



Obr. 39 Oblast převýšení kořene vzorku 2D, neleptáno (výskyt oblasti s lupínkovým grafitem)



Obr. 40 Oblast převýšení kořene vzorku 2D, leptáno (výskyt oblasti s lupínkovým grafitem a jednotlivými odmíšenými pásmy)



Obr. 41 Detail odmíšených pásem vzorku 2D



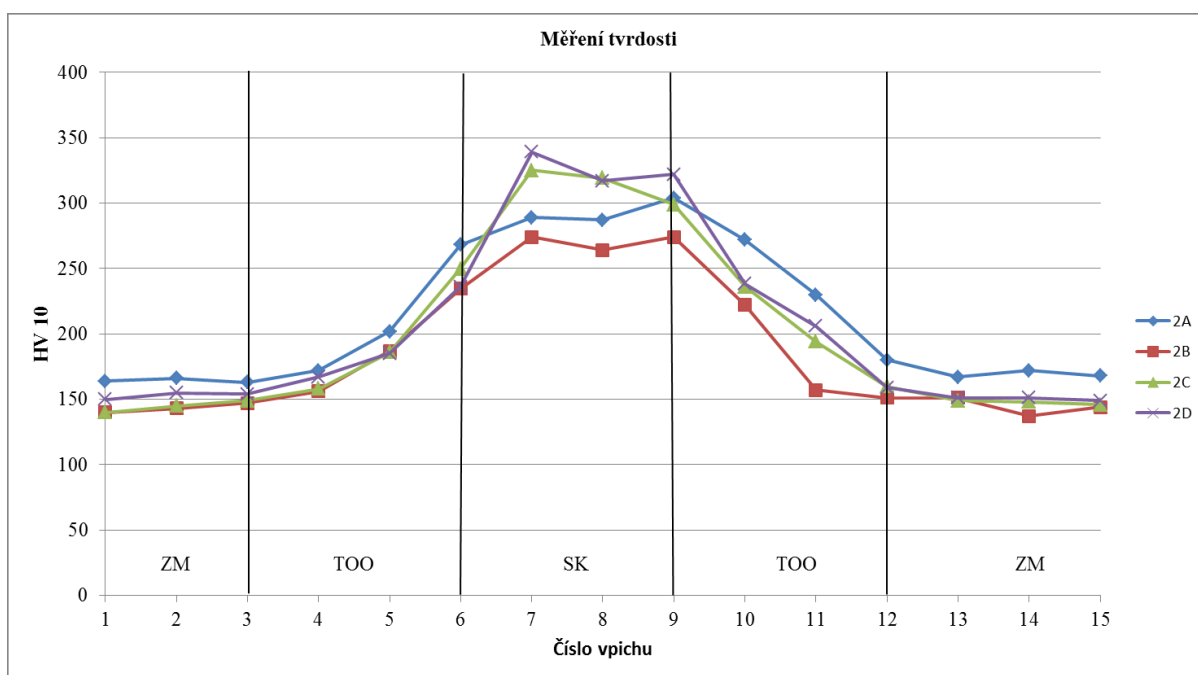
Obr. 42 Pásmo s výskytem laťkového martenzitu a velkého množství zbytkového austenitu u vzorku 2D



Obr. 43 Oblast s výskytem ledeburitu, martenzitu a zbytkového austenitu u vzorku 2D

6.3 Zkouška tvrdosti

Měření tvrdosti proběhlo dle Vickerse při zatížení HV 10 při teplotě 20°C. Měřená linie byla umístěna v polovině tloušťky svaru. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v podobě grafu na obrázku č. 44 a v podobě tabulky v příloze A.

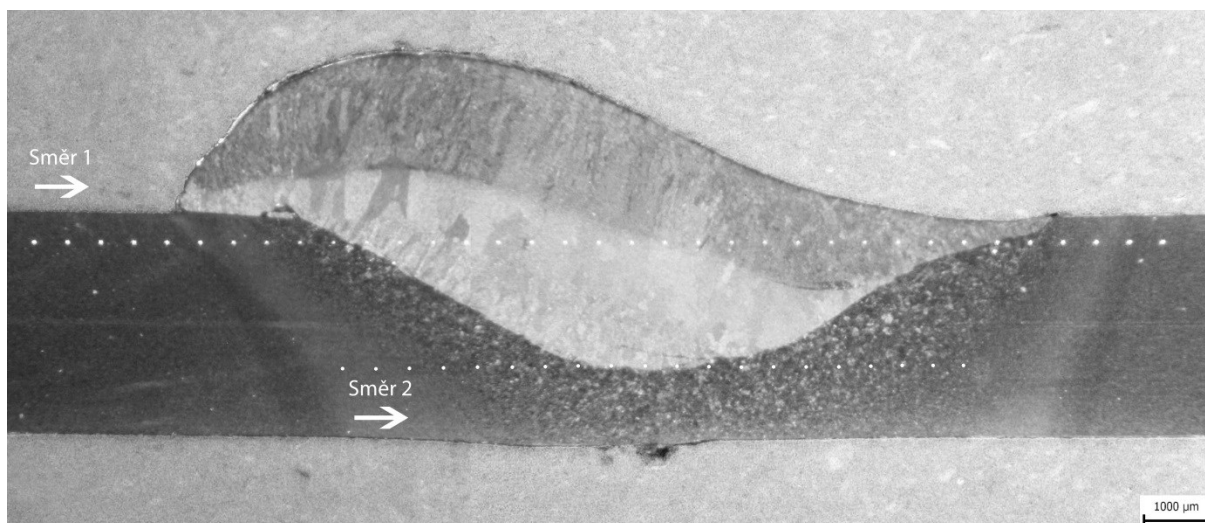


Obr. 44 Graf závislosti jednotlivých vpichů a odpovídající tvrdost jednotlivých vzorků

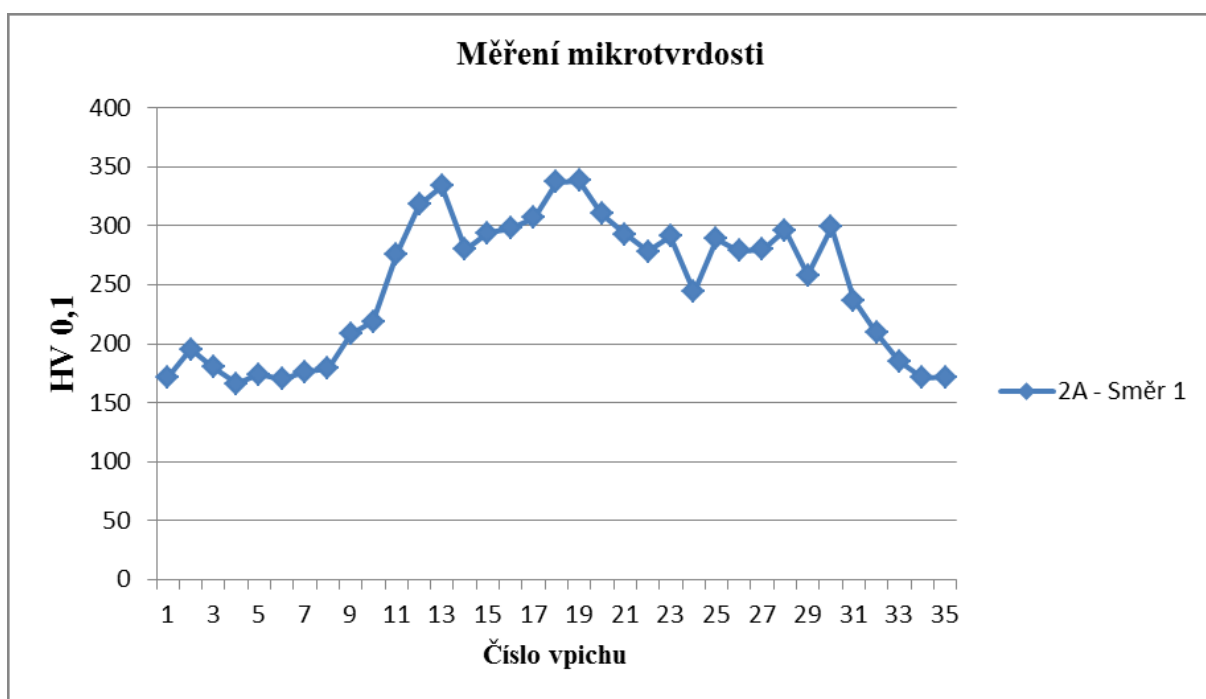
6.4 Zkouška mikrotvrlosti

Měření mikrotvrlosti bylo provedeno na mikrotvrdoměru LECO LM247AT při zatížení HV 0,1 ve vzdálenosti cca 0,4 mm pod povrchem z obou stran, u vzorku 2A pak ve stejné vzdálenosti z horní strany a ve vzdálenosti 1 mm od strany dolní. Nejprve je uvedeno schéma vzorku s naznačenými směry měření a po té graf, kde na vodorovné ose je uvedeno číslo vpichu, na svislé odpovídající hodnota mikrotvrlosti.

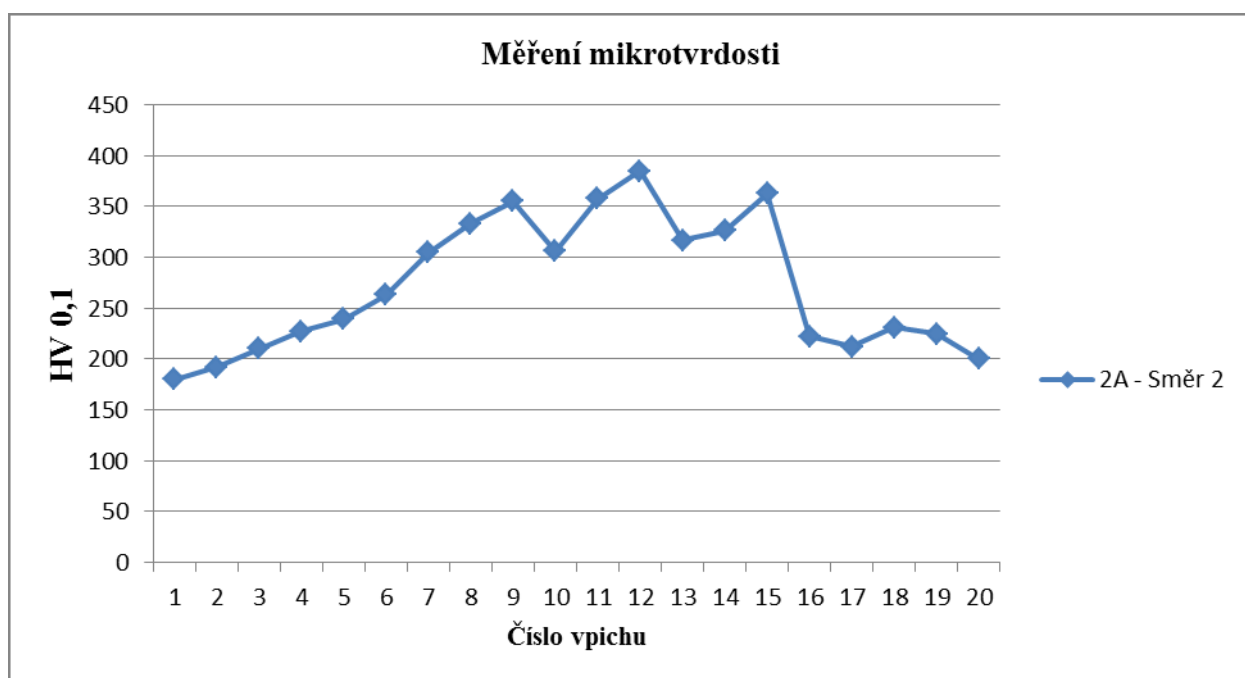
V příloze B jsou uvedeny jednotlivé mikrotvrlosti v podobě tabulky.



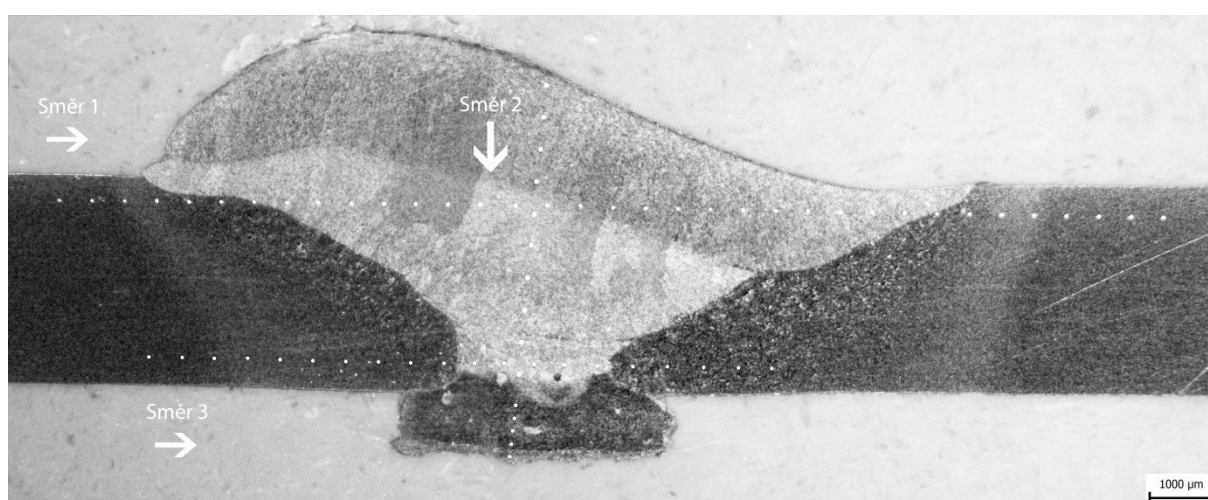
Obr. 45 Schéma měření mikrotvrlosti vzorku 2A



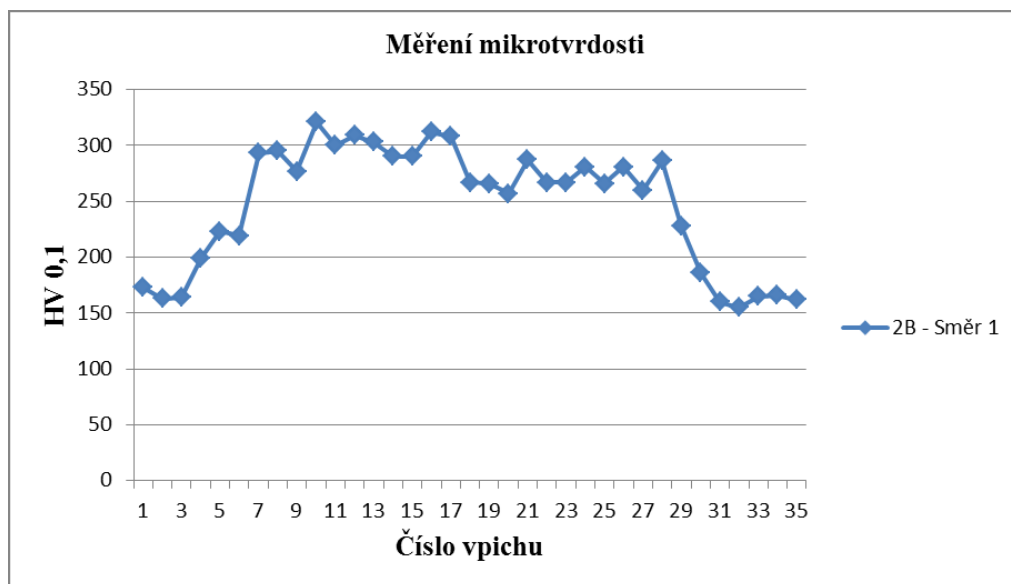
Obr. 46 Graf jednotlivých vpichů a odpovídající mikrotvrlosti vzorku 2A – směr 1



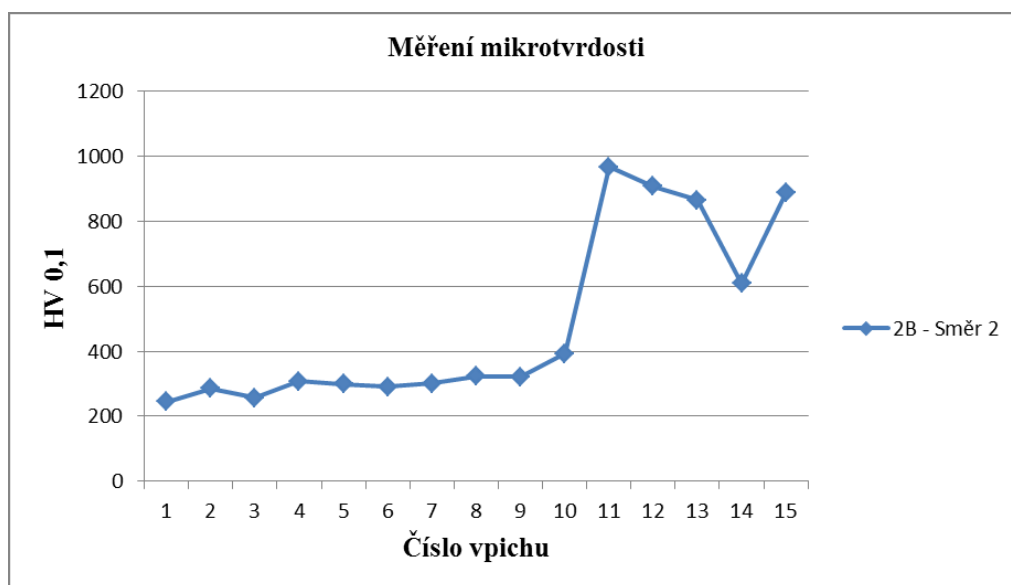
Obr. 47 Graf jednotlivých vpichů a odpovídající mikrotvrdosti vzorku 2A – směr 2



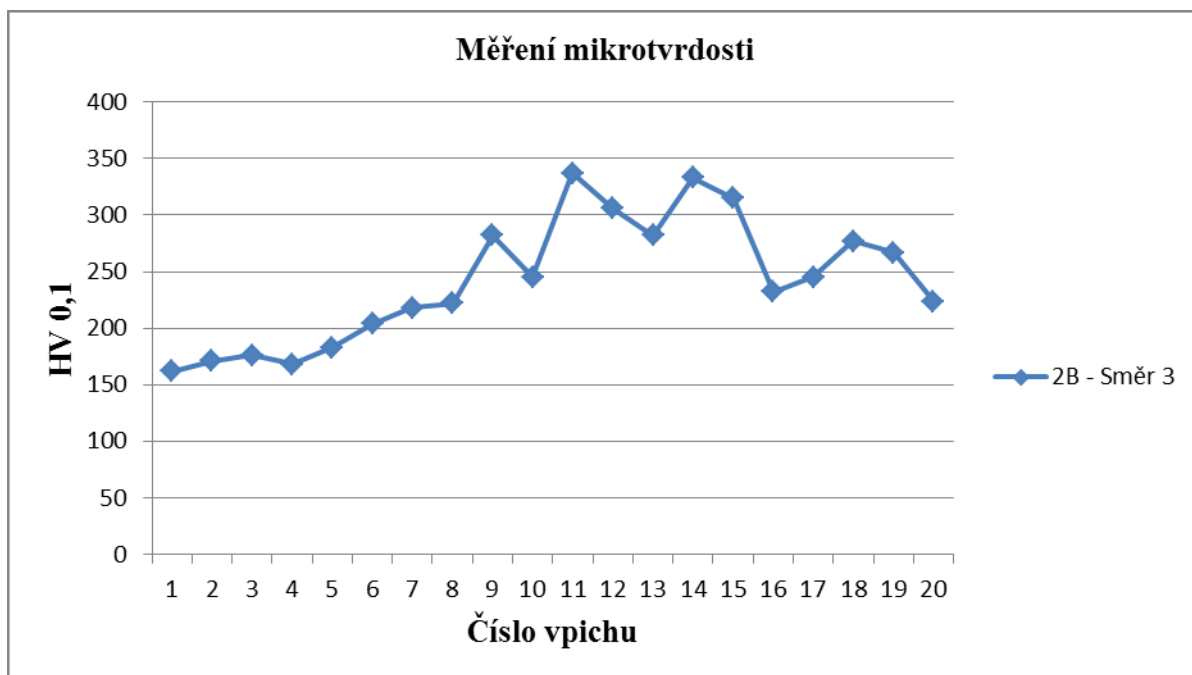
Obr. 48 Schéma měření mikrotvrdosti vzorku 2B



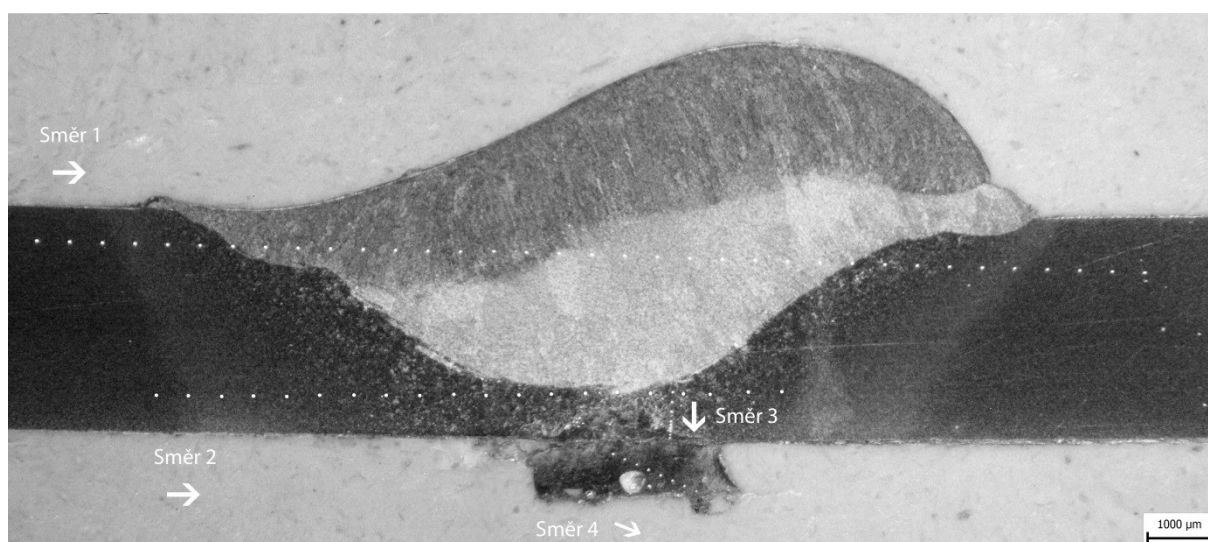
Obr. 49 Graf jednotlivých vpichů a odpovídající mikrotvrlosti vzorku 2B – směr 1



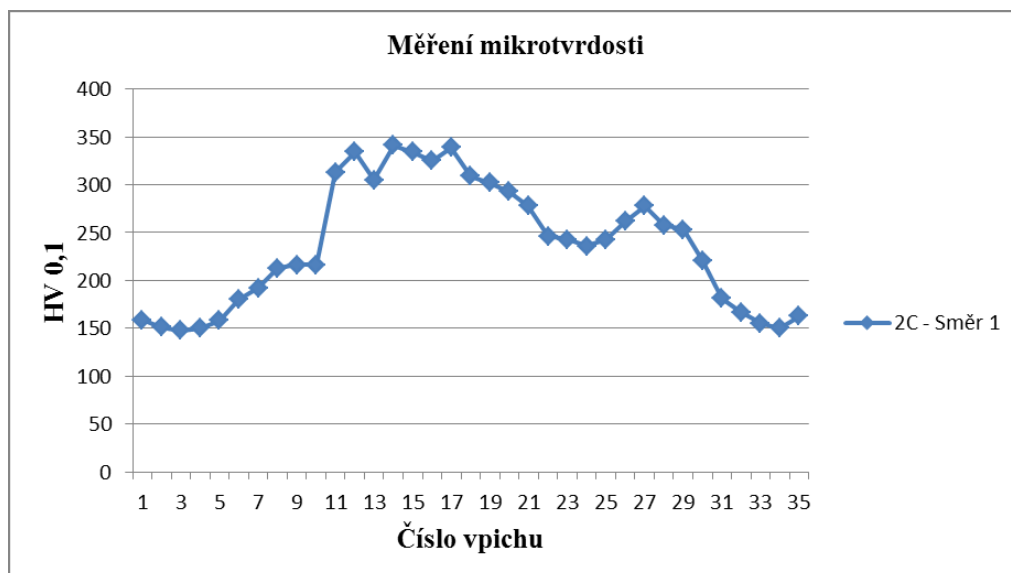
Obr. 50 Graf jednotlivých vpichů a odpovídající mikrotvrlosti vzorku 2B – směr 2



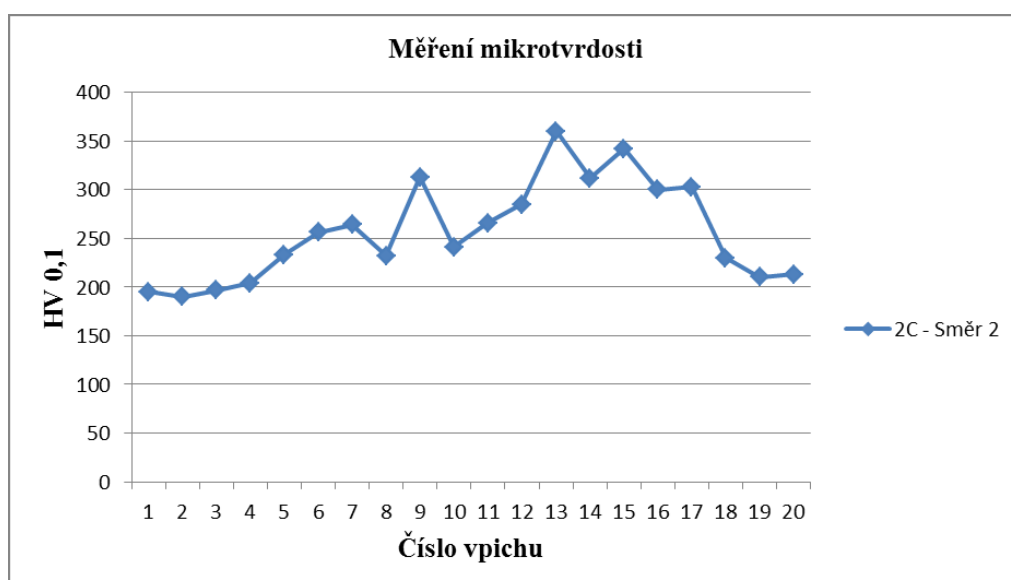
Obr. 51 Graf jednotlivých vpichů a odpovídající mikrotvrdosti vzorku 2B – směr 3



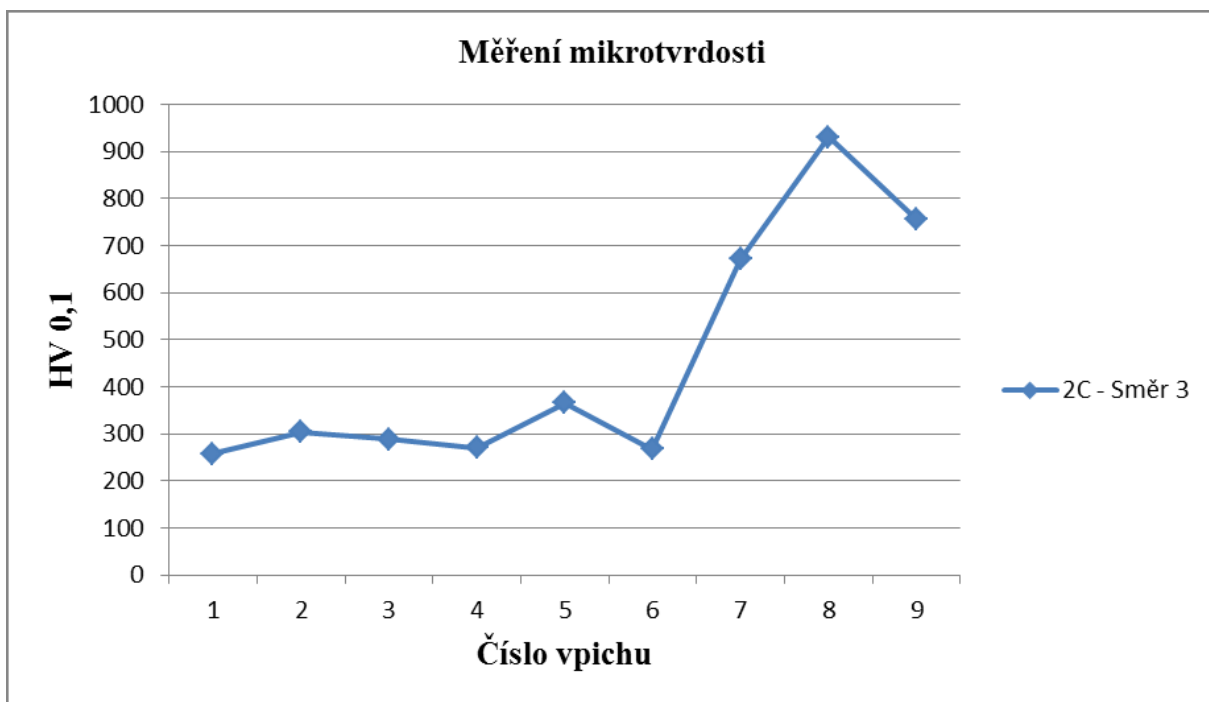
Obr. 52 Schéma měření mikrotvrdosti vzorku 2C



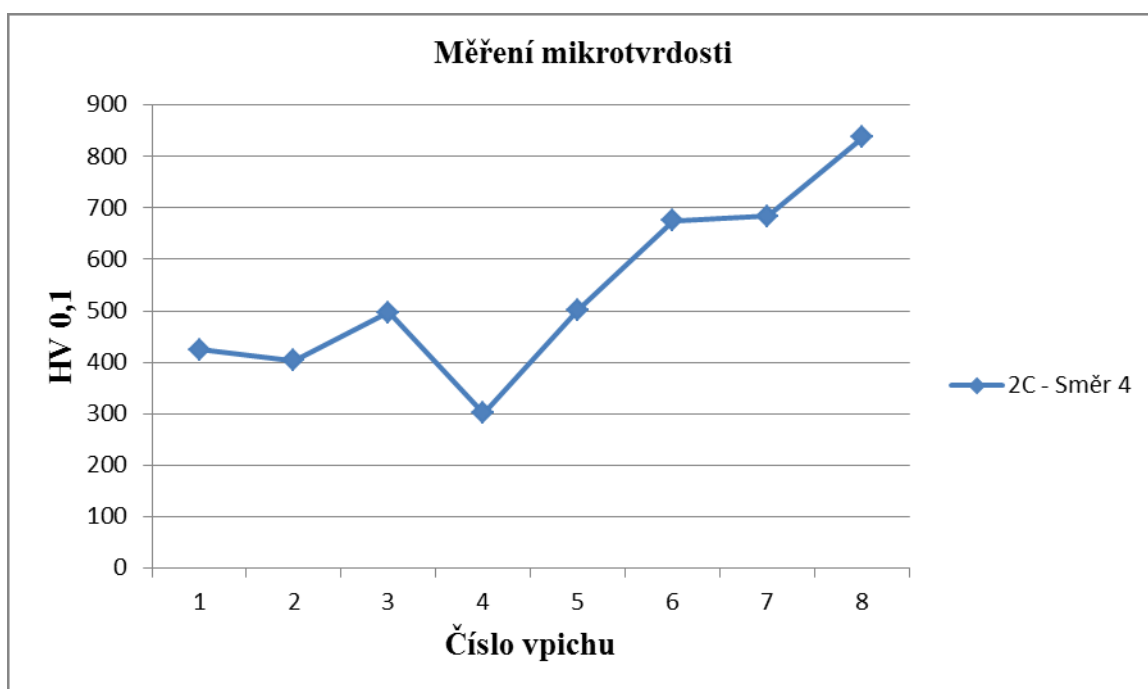
Obr. 53 Graf jednotlivých vpichů a odpovídající mikrotvrdosti vzorku 2C – směr 1



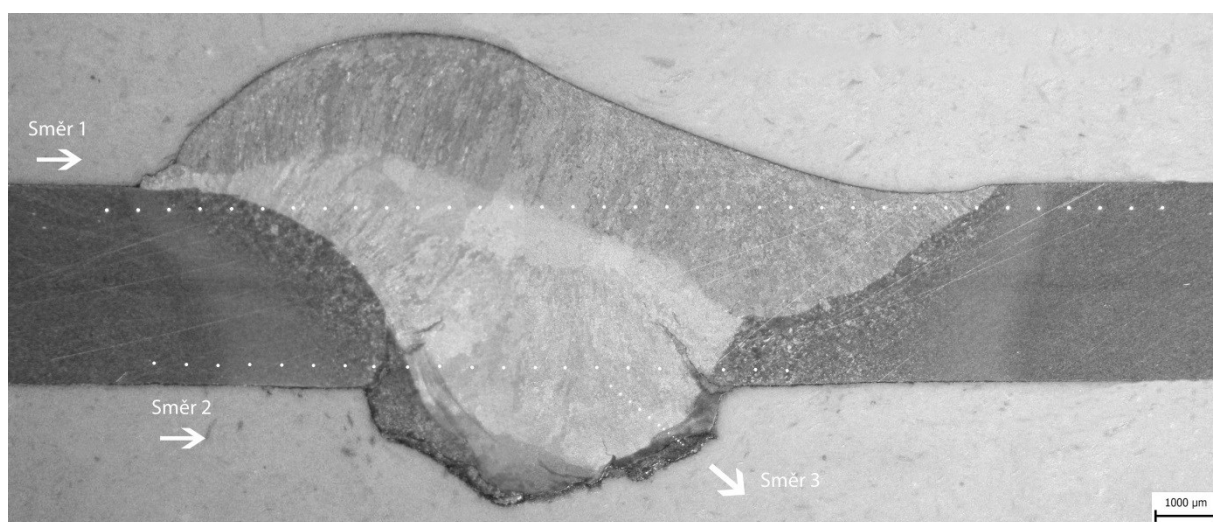
Obr. 54 Graf jednotlivých vpichů a odpovídající mikrotvrdosti vzorku 2C – směr 2



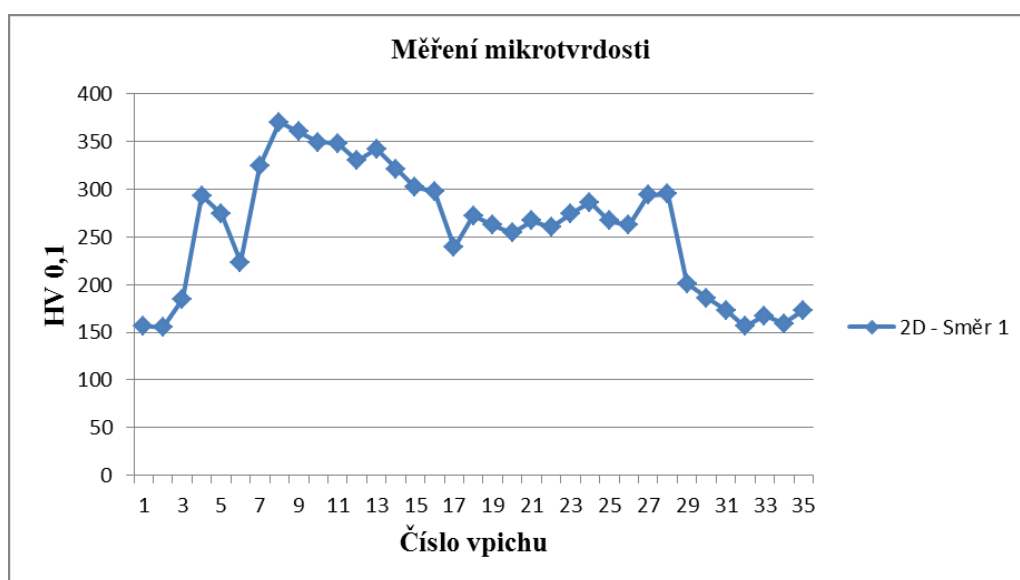
Obr. 55 Graf jednotlivých vpichů a odpovídající mikrotvrdomosti vzorku 2C – směr 3



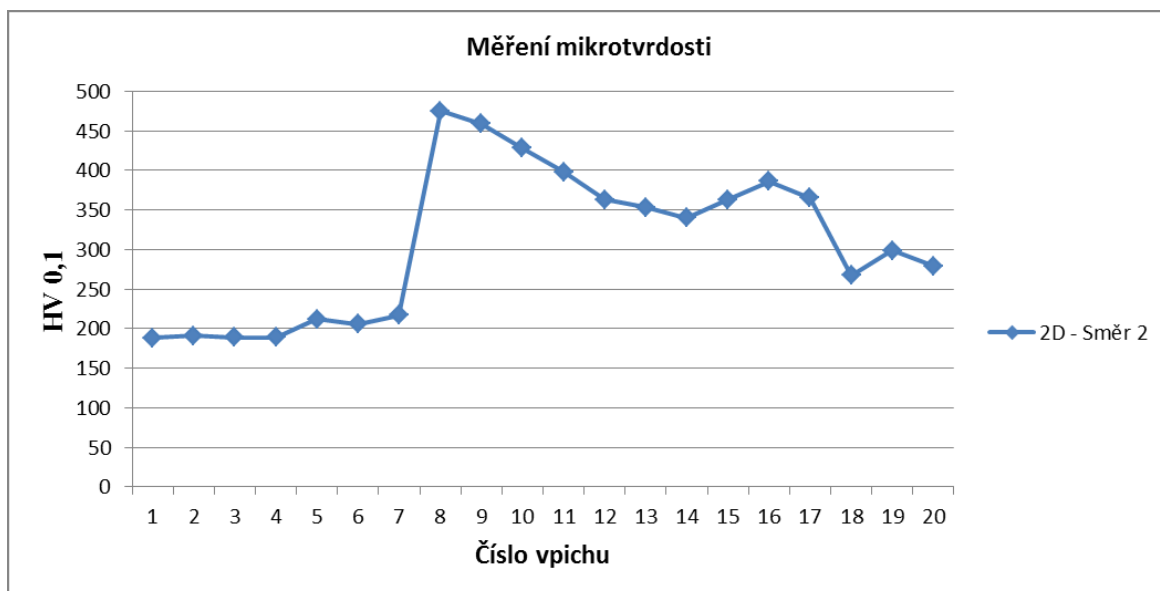
Obr. 56 Graf jednotlivých vpichů a odpovídající mikrotvrdomosti vzorku 2C – směr 4



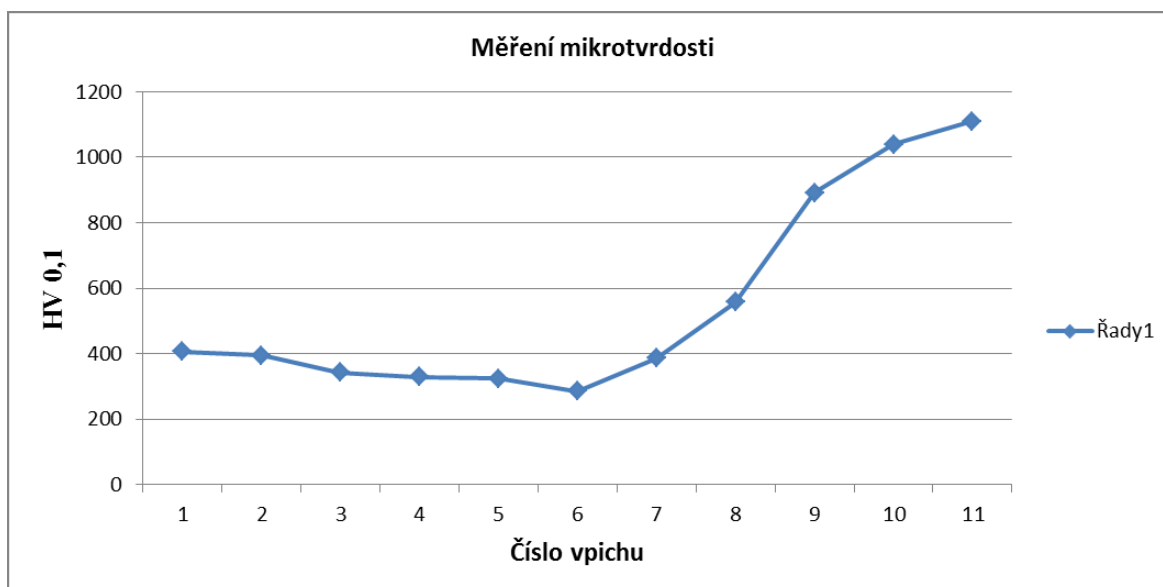
Obr. 57 Schéma měření mikrotvrdosti vzorku 2D



Obr. 58 Graf jednotlivých vpichů a odpovídající mikrotvrdosti vzorku 2D – směr 1



Obr. 59 Graf jednotlivých vpichů a odpovídající mikrotvrdosti vzorku 2D – směr 2



Obr. 60 Graf jednotlivých vpichů a odpovídající mikrotvrdosti vzorku 2D – směr 3

7. Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout technologický postup pro svařování vybrané části kompresoru. Jako nejlepší metoda pro svaření byla vybrána metoda 135 a pomocí ní byly provedeny i zkušební svary. Z dané součásti byly vyřezány čtyři kusy vzorků, a u nich byla provedena zkouška makrostruktury, mikrostruktury, tvrdosti a mikrotvrdosti.

Výsledkem těchto zkoušek bylo, že vzorky obsahovaly vady typu trhliny, póry, přetečení materiálu, studený spoj a u jednoho ze vzorků byl přítomen vměstek. Výskyt vad se dal předpokládat, vzhledem k obtížnosti svařitelnosti litiny. Řešením by byla buď změna svařovacích parametrů, změna materiálu, nebo konstrukční změna, kdy daný svar bude sloužit pouze pro spojení skruženého plechu a pro přivařenou litinovou součást bude jen jako podpora.

Pro zjištění rozložení uhlíku ve svarovém spoji by bylo vhodné provést chemickou energiově-disperzní liniovou analýzu na elektronovém mikroskopu, což by ovšem bylo nad rámec této práce.

8. Poděkování

Rád bych tímto poděkoval doc. Ing. Drahomíru Schwarzovi, CSc. za odborné vedení a cenné rady při zpracovávání této práce. Rovněž bych rád poděkoval Ing. Zdeňku Štorkánovi za trpělivost a užitečné rady především při metalografických zkouškách.

9. Použitá literatura

- [1] MIG/MAG (CO₂). *Internetový magazín Automig* [online]. 2015 [cit. 2014-12-06].
Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/migmag-co2/>
- [2] KUNCIPÁL, Josef. *Teorie svařování*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1986, 265 s.
- [3] HLAVATÝ, Ivo. *Teorie a technologie svařování [online]*. 1. vyd. Ostrava, 2011
[cit.2014-12-06]. ISBN 978-80-248-2414-7. Dostupné z:
<http://fs1.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/indexs.htm>
- [4] BARTÁK, Jiří. Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory.
1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2002, 418 s. ISBN 80-857-7197-7.
- [5] Plazmové, elektronové a laserové svařování: doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.,
In: *Svět svaru: časopis o moderních trendech ve svařování* [online]. 2010 [cit. 2014-12-[06].
Dostupné z: <http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/2010-1%20Plazma-laser-elektronov%C3%A9.pdf>
- [6] KOUKAL, Jaroslav a Tomáš ZMYDLENÝ. Svařování I. 1. vyd. Ostrava:
VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005, 133 s. ISBN 978-80-248-0870-3.
- [7] TIG. *Internetový magazín Automig* [online]. 2015 [cit. 2014-12-06].
Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/tig-wig-plasmatig/>
- [8] KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. Materiály a jejich svařitelnost.
1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009, 240 s. ISBN 978-80-248-2025-5.
- [9] KOPEC, Bernard. Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV).
Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008, 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4.

10. Seznam příloh:

Příloha A Výsledek zkoušky tvrdosti

Příloha B Výsledek zkoušky mikrotvrdosti

Příloha A – výsledek zkoušky tvrdosti

Vzorek	tvrdost HV10														
	Základní mat.			TOO			Sv. kov			TOO			Základní mat.		
2A						289				274					
	164	166	163	172	202	251	289	287	304	238	230	180	167	172	168
						264				304					
2B						230				238					
	140	143	147	156	187	253	274	264	274	206	157	151	151	137	144
						221				222					
2C						253				243					
	140	145	149	158	186	232	325	319	299	235	194	160	149	148	146
						264				230					
2D						212				272					
	150	155	154	167	185	253	339	317	322	218	206	159	151	151	149
						243				225					

Příloha B – výsledek zkoušky mikrotvrdosti

Vpich č.	Mikrotvrdost HV 0,1											
	2A Směr 1	2A Směr 2	2B Směr 1	2B Směr 2	2B Směr 3	2C Směr 1	2C Směr 2	2C Směr 3	2C Směr 4	2D Směr 1	2D Směr 2	2D Směr 3
1	172	180	173	245	162	159	195	257	425	157	188	406
2	195	192	163	285	171	151	190	304	404	155	191	395
3	180	210	164	257	176	148	197	289	497	185	189	342
4	166	227	199	307	168	150	204	270	301	293	189	329
5	174	239	223	299	183	158	233	366	502	274	212	324
6	170	263	219	291	204	180	256	267	675	223	206	286
7	176	305	293	301	218	192	264	672	684	324	217	386
8	179	333	295	323	222	213	232	931	837	370	475	558
9	208	355	277	321	282	216	313	755		360	459	891
10	219	306	321	393	245	216	241			349	428	1040
11	276	358	300	966	337	313	266			348	398	1110
12	318	385	309	908	306	334	285			330	363	
13	334	317	303	865	282	305	360			342	353	
14	280	326	290	609	333	341	312			321	340	
15	294	363	290	887	315	334	342			302	363	
16	298	222	312		232	325	300			298	386	
17	307	212	308		245	339	303			239	365	
18	337	231	267		277	309	230			272	267	
19	338	225	266		267	302	210			262	299	
20	310	200	257		224	293	213			254	279	
21	293		287			278				267		
22	278		267			246				260		
23	291		267			243				274		
24	244		281			236				286		
25	289		266			243				267		
26	279		281			262				262		
27	280		260			278				294		
28	296		286			258				295		
29	258		228			253				201		
30	299		186			221				186		
31	237		160			181				173		
32	209		155			167				156		
33	185		165			155				167		
34	171		166			150				159		
35	172		162			163				173		